

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Ciências e Tecnologia da Biomassa

**Influência do manejo da cultura no balanço energético da utilização de
Miscanthus na produção de energia, em Portugal**

Élia Mónica Lopes Franco

**Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Energia e
Bioenergia**

Orientadora: Professora Doutora Ana Luísa Almaça da Cruz Fernando

Monte de Caparica

2012

“Influência do manejo da cultura no balanço energético da utilização de *Miscanthus* na produção de energia, em Portugal”

© Élia Franco, FCT/UNL, UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, têm o direito perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram a terminar este projeto, especialmente:

À minha orientadora, Professora Doutora Ana Luísa Almaça da Cruz Fernando, pelo seu grande esforço pessoal e profissional com que me apoiou na orientação da presente Dissertação, e que sem ela, decerto não teria conseguido.

À Professora Benilde Simões Mendes, coordenadora do Mestrado de Energia e Bioenergia, que me incentivou e ajudou a conseguir entrar neste Mestrado.

A todos os professores do Mestrado de Energia e Bioenergia pelo apoio dispensado durante o mestrado.

Aos meus familiares e amigos, especialmente, pais, irmãs e namorado, pelo apoio e motivação que me deram ao longo da realização deste trabalho.

Resumo

Tendo como principal perspetiva o desenvolvimento sustentável, pretende-se com este trabalho avaliar o balanço energético da utilização de *Miscanthus* na produção de energia, tendo em conta a data da colheita e a altura a que é efectuado o corte da plantação.

Na produção de energia considerou-se a combustão de biomassa, por ser o método que já está implementado a nível industrial e comercial. Neste contexto estudaram-se três diferentes datas de colheita: A) colheita em setembro; B) colheita em novembro; C) colheita em janeiro. Para cada data de colheita consideraram-se diversas hipóteses associadas à altura a que o corte é efetuado: 1) totalidade do caule, desde a base até ao topo; 2) corte efetuado a cerca de 25 cm do solo, deixando no solo a fração de caule de 0-25cm, pois esta é rica em material mineral e nutrientes; 3) corte efetuado no topo do caule a cerca de 200cm do solo, deixando esta fração de topo no solo, uma vez que é uma fração muito rica em material mineral e nutrientes, seguindo-se o corte na base da planta, com aproveitamento dos caules com alturas desde a base até aos 200cm; 4) corte efetuado no topo do caule a cerca de 200cm do solo, deixando esta fração de topo no solo, seguindo-se o corte a cerca de 25 cm do solo, com aproveitamento dos caules com alturas desde os 25 cm do solo até aos 200cm.

Obtiveram-se valores de balanço energético anual entre 162-232 GJ/ha e de razão produção energética/consumo energético entre 9,1-10,6. Atendendo a que os valores do balanço são positivos e os valores da razão energética são superiores à unidade, o estudo mostra que se deve considerar o cultivo e utilização dos *Miscanthus* para produção de energia em Portugal. Do ponto de vista energético, as colheitas de setembro e novembro e o cenário 1, no qual os caules são aproveitados da base ao topo, são as hipóteses que apresentaram os resultados mais elevados, devido a uma maior quantidade de biomassa processada. Os fatores que mais contribuem para o consumo energético são a energia necessária à conversão energética e à rega.

Considerando que na utilização de *Miscanthus* na produção de energia, devem ser tidos em conta outros fatores, nomeadamente os relacionados com a qualidade da biomassa, estudou-se também o efeito da data da colheita e da altura a que é efectuado o corte da plantação, nas emissões de azoto. A análise global, agregando os valores do balanço energético e das emissões de azoto decorrentes da utilização de *Miscanthus* para energia, indicam que a opção que apresenta resultados com maior benefício é a colheita em novembro, utilizando a totalidade do caule (da base ao topo).

Palavras-chave: *Miscanthus x giganteus*, balanço energético, produção de energia, impacto ambiental, emissões de azoto.

Abstract

Considering the sustainable development, the aim of this work was to evaluate the energy balance of the utilization of *Miscanthus* for energy production, taking into account different harvest dates and different cutting heights of the plantation.

For the energy production it was considered the combustion of biomass, because it is the method that is already implemented at an industrial and commercial level. In this context, three different harvest dates were studied: A) September harvest; B) November harvest; C) January harvest. For each harvest date it was considered several hypothesis associated with the height at which the cut is performed: 1) whole stem, from the bottom to the top; 2) cut made approximately at 25 cm from the ground, leaving in the ground the stem fraction 0-25cm, since this is a richer mineral material; 3) cut made at the top of the stem at about 200cm from topsoil, leaving this top fraction in the soil since it is a fraction rich in mineral materials and nutrients, followed by cutting at the base of the plant, with recovery of stem heights from the base up to 200cm, 4) cut made at the top of the stem to about 200cm from topsoil, leaving this portion on the soil, followed by cutting at about 25 cm above ground, with recovery of stems from 25cm to 200cm height.

The energy balance annual values obtained were in the range 162-232 GJ / ha and the ratio energy production / energy consumption values were 9.1 to 10.6. The positive energy balance and the ratio values above one shows that one must consider the cultivation and utilization of *Miscanthus* for energy production in Portugal. In terms of the energy produced the September and November harvests and the first scenario, in which the stems are recovered from bottom to top, are the hypothesis that showed the highest results, due to a higher amount of processed biomass. The factor that most contribute to the energy consumption is the energy required for energy conversion and irrigation.

Whereas the use of *Miscanthus* in energy production must be taken into account other factors such as those related to the quality of the biomass, it was also studied the effect of the harvest date and different cutting heights, on nitrogen emissions. The global analysis, adding the values of energy balance and emissions of nitrogen from the use of *Miscanthus* for energy, indicate that the option which presents results with greater benefit is the harvest in November, using the whole stem (from bottom to top).

Keywords: *Miscanthus x giganteus*, energy balance, production of energy, environmental impact, nitrogen emissions.

Índice de matérias

Agradecimentos	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice de matérias	xi
Índice de figuras	xiv
Índice de Tabelas	xvii
1. Introdução	1
1.1 <i>Miscanthus</i> × <i>giganteus</i>	1
1.1.1 Morfologia	2
1.1.2 Fatores edafo – climáticos	3
1.1.3 Nutrientes.....	6
1.1.4 Espécies infestantes, doenças e pragas	7
1.1.5 Propagação.....	8
1.1.6 Ciclo de crescimento	10
1.1.7 Produtividade	11
1.1.8 Colheita.....	12
1.1.9 Armazenamento	13
1.1.10 Utilizações do <i>Miscanthus</i>	13
1.1.11 Aspectos ambientais da produção e utilização de <i>Miscanthus</i>	14
1.2. Proposta de estudo	16
2. Metodologia.....	17
2.1 Balanço energético.....	18
No transporte.....	21
2.2 Impacte ambiental – emissões de azoto	23
3. Resultados e sua Discussão.....	24
3.1 Balanço energético da utilização de <i>Miscanthus</i> na produção de energia, por combustão, em Portugal	24
3.2 Impacte ambiental – emissões de azoto	31

3.3	Análise de sensibilidade	38
3.3.1	Contabilização das emissões de azoto associadas à utilização e poupança de combustíveis fósseis	38
3.3.2	Redução das emissões de azoto associadas à aplicação do fertilizante azotado	41
3.3.3	Redução das emissões de azoto associadas à combustão da biomassa ..	43
3.3.4	Redução da aplicação do fertilizante azotado	44
3.3.5	Variação na produtividade da cultura	47
3.3.6	Análise global	49
4.	Conclusões	50
5.	Bibliografia	52

Índice de figuras

Figura 1.1 - <i>Miscanthus x giganteus</i>	2
Figura 1.2 - Pormenor da flor de <i>Miscanthus x giganteus</i>	3
Figura 1.3 - Exemplo de máquina que permite a instalação de <i>Miscanthus</i> no solo	10
Figura 1.4 – Ciclo de crescimento do <i>Miscanthus</i>	11
Figura 1.5 – Exemplos de máquinas de enfardamento do <i>Miscanthus</i>	13
Figura 2.1 – Cenários associados à altura do corte da cultura de <i>Miscanthus</i> (Cenário 1: base-topo; Cenário 2: 25cm-topo; Cenário 3: base-200cm; Cenário 4; 25-200cm)	17
Figura 3.1- Razão energética do cultivo de <i>Miscanthus</i> , no mês de setembro.	26
Figura 3.2 – Balanço energético, para os diferentes cenários, para a colheita de setembro.	27
Figura 3.3 – Razão energética, para as diferentes datas de colheita, para o Cenário 1 (aproveitamento do caule da base até ao topo).....	28
Figura 3.4 – Balanço energético, para as diferentes datas de colheita, para o Cenário 1 (aproveitamento do caule da base até ao topo).....	28
Figura 3.5 – Razão energética, para as diferentes datas de colheita, e para os diferentes cenários de altura do corte.....	29
Figura 3.6 – Balanço energético, para as diferentes datas de colheita, e para os diferentes cenários de altura do corte.....	29
Figura 3.7 – Energia necessária para a produção, transporte e conversão de <i>Miscanthus</i> , para os diferentes cenários apresentados, para a colheita de setembro, ao longo de 15 anos.	30
Figura 3.8 – Distribuição do consumo energético (%) necessário para a produção, transporte e conversão de <i>Miscanthus</i> , para o Cenário 1, na colheita de setembro, ao longo de 15 anos.	31
Figura 3.9 – Resultados normalizados para o balanço energético e para as emissões de azoto, nas diferentes datas de colheita e nos diferentes cenários de corte da biomassa ..	36
Figura 3.10 – Classificação global da utilização de <i>Miscanthus</i> para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa (SP1 - os indicadores têm o mesmo peso; SP2 - balanço energético com maior peso; SP3 - emissões de azoto com maior peso); as setas a preto indicam em cada sistema de ponderação a opção que apresenta resultados mais	

reduzidos (e mais positivos); as setas a vermelho indicam em cada sistema de ponderação as opções que apresentam os resultados mais elevados (e mais negativos) 37

Figura 3.11 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, com e sem as emissões associadas à combustão de combustíveis fósseis; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos)40

Figura 3.12 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, e para diferentes taxas de escoamento e lixiviação do fertilizante azotado aplicado; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos)42

Figura 3.13– Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, e para diferentes taxas de emissão dos NOx formados na combustão da biomassa; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos)44

Figura 3.14– Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, e para diferentes taxas de aplicação do fertilizante azotado; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos).....47

Figura 3.15 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, e para diferentes produtividades da cultura; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos) .48

Figura 3.16 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, tendo em conta os parâmetros modificados na análise de sensibilidade.....49

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Produtividade em caules de <i>Miscanthus</i> (Fonte: Fernando, 2005), em matéria seca (ms) e com 10% de humidade (mh), para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte.....	22
Tabela 2.2 - Metodologias de avaliação das emissões de azoto (Fernando <i>et al.</i> , 2010c).	23
Tabela 3.1 – Cálculo do balanço energético na produção e conversão em energia dos <i>Miscanthus</i> , supondo uma duração do campo de 15 anos	24
Tabela 3.1 – Cálculo do balanço energético na produção e conversão em energia dos <i>Miscanthus</i> , supondo uma duração do campo de 15 anos (continuação)	25
Tabela 3.2 – Emissões derivadas da aplicação do fertilizante azotado (IPCC, 2006).....	32
Tabela 3.3 – Quantidade de azoto acumulada nos caules de <i>Miscanthus</i> (Fonte: Fernando, 2005), e emissões de azoto derivadas da combustão, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte.....	33
Tabela 3.4 – Emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado e da quantidade de azoto acumulada nos caules de <i>Miscanthus</i> , para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte	34
Tabela 3.5 – Emissões de azoto associadas à utilização e poupança de combustíveis fósseis na utilização de <i>Miscanthus</i> para energia, e balanço de emissões evitadas, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte	39
Tabela 3.6 – Emissões de azoto estimadas incluindo a utilização e poupança de combustíveis fósseis na utilização de <i>Miscanthus</i> para energia, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (com as emissões associadas à combustão de combustíveis fósseis)	40
Tabela 3.7 – Emissões derivadas da aplicação do fertilizante azotado, considerando 15% nas emissões por escoamento e lixiviação.....	41
Tabela 3.8 – Emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado e da quantidade de azoto acumulada nos caules de <i>Miscanthus</i> , para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (com redução das emissões de azoto escoadas e lixiviadas do fertilizante azotado)	41
Tabela 3.9 – Emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de azoto acumulada nos caules de <i>Miscanthus</i> , e totalidade das emissões de azoto, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (com redução da taxa de emissão dos NOx).....	43
Tabela 3.10 – Balanço de azoto para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte	45

Tabela 3.11 – Balanço energético na produção e conversão em energia dos *Miscanthus*, e emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado e da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus*, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (com redução da aplicação do fertilizante azotado para 40 kg/ha, N).....46

Tabela 3.12 – Balanço energético na produção e conversão em energia dos *Miscanthus*, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (considerando variações na produtividade da cultura).....48

1. Introdução

O interesse no uso de biomassa para produção de energia está em constante crescimento, principalmente na Europa, pois a biomassa pode ser um excelente substituto dos combustíveis fósseis para produção de biocombustíveis, apresentando aspectos favoráveis (mas também constrangimentos) quer do ponto de vista económico, quer ambiental quer também social (Dauber *et al.*, 2012).

Uma cultura muito promissora nesta área é o *Miscanthus*. É uma planta perene, de longa duração (10 a 15 anos), que cresce fácil e rapidamente, que apresenta elevadas produtividades, propagando-se pelo rizoma e pelas raízes. Apresenta elevada eficiência na assimilação e uso de azoto e de água, e apresenta uma reduzida suscetibilidade a pragas e infestações. No final de cada ano, as plantas podem ser colhidas, renascendo no ano seguinte a partir do caule cortado. A biomassa colhida, devido ao seu teor elevado em material lenhocelulósico de boa qualidade, pode ser valorizada economicamente, por exemplo, na produção de energia ou de pasta para papel, entre outras utilizações. Desenvolvem uma massa radicular densa, que se adapta bem a zonas alagadas e em anos secos, as raízes podem estender-se até aos lençóis freáticos. (Fernando, 2005).

1.1 *Miscanthus x giganteus*

O *Miscanthus x giganteus* (figura 1.1) é uma das potenciais culturas para a produção de energia, materiais de construção, têxteis e substratos para viveiros e estufa (Glowacka, 2011).

Esta planta é originária da Ásia, mas hoje em dia está presente numa grande variedade de ambientes, tais como margens de rios, desertos vulcânicos, terrenos agrícolas, áreas montanhosas de baixa e alta elevação, etc. Sendo uma espécie relativamente recente na Europa necessita de apoios para a sua cultura e utilização, sendo que inicialmente era utilizada como ornamento (Glowacka, 2011).

É um híbrido formado a partir de outras duas espécies: *Miscanthus x sinensis* e *Miscanthus x sacchariflorus* (Glowacka, 2011) e para além de ser uma cultura perene, realiza a fotossíntese por via em C4, é uma planta rizomatosa e lenhocelulósica, atributos muito positivos principalmente para a produção de energia (Heaton *et al.*, 2010).

Esta planta possui inúmeras características favoráveis: apresenta elevadas taxas de fotossíntese devido a esta ser realizada pela via C4 e tem uma elevada taxa de fixação de dióxido de carbono. Portanto, o *Miscanthus* tem uma elevada produção e pode crescer muito rapidamente, até 4 metros de altura, produzindo altos rendimentos anuais de biomassa (cerca de 20 a 26 toneladas de biomassa seca por hectare) (le Ngoc Huyen *et al.*, 2010).



Figura 1.1 - *Miscanthus x giganteus*

[Fonte: <http://appraisercom.com/forum/index.php?id=2084>].

Outras vantagens, são por exemplo: é ideal na zona temperada com o seu alto rendimento em biomassa, elevada tolerância ao frio, baixo impacto ambiental, resistência a pragas e a doenças, facilidade de colheita e manuseamento e não é uma planta invasiva (Jorgensen, 2010). Para além disso, é de interesse agronómico devido ao seu elevado rendimento e aos diversos usos da sua biomassa. Tem baixos teores de cinzas, água e minerais, tais como cloretos. Além disso a biomassa desta planta pode ser utilizada em materiais de construção, tais como placas prensadas ou como fonte de celulose (Lewandowski, 1998).

Várias experiências, em vários locais da Europa concluem que esta é a cultura com capacidade para produzir maior quantidade de energia entre as várias plantas utilizadas para o mesmo fim. Como esta cultura produz biomassa de forma eficiente, pode desempenhar um papel muito importante na agricultura sustentável para produção de biocombustíveis, num futuro próximo (Glowacka, 2011). Uma das utilizações mais viáveis nas culturas de biomassa, como o *Miscanthus*, está na sua utilização como combustível renovável para utilização em aquecimento e produção de energia elétrica (Christian, 2008).

1.1.1 Morfologia

O *M. x giganteus* é uma planta perene e é um híbrido natural produzido a partir de *M. sacchariflorus* e *M. sinensis* e foi originalmente introduzido na Europa como planta ornamental (Fernando, 2005; El Bassam, 2010). Os caules são retos, vigorosos e geralmente não são ramificados. Têm, aproximadamente 10mm de diâmetro e podem atingir uma altura até 2m em

pouco mais de um ano, e até 4m nos anos seguintes. A altura inferior no primeiro ano é resultado de uma grande quantidade de energia que é utilizada pela planta para o estabelecimento em extensão e profundidade do sistema de raízes e rizomas. Os rizomas constituem um sistema de armazenamento altamente ramificado. As raízes geralmente podem penetrar até mais de um metro no solo. Embora grande parte do crescimento subterrâneo ocorra no primeiro ano, a colheita geralmente só atinge a maturidade depois de 2-3 anos (Fernando, 2005; El Bassam, 2010). As folhas são caulinas, planas e lineares, tendo lâminas foliares de tamanho superior a 50 x 3,0 cm. As flores são muito bonitas, dispendo-se no topo do caule em racimos abundantes, ao longo de um eixo central. As inflorescências têm cerca de 30 cm de comprimento. A época de floração é entre setembro e novembro. (Fernando, 2005)



Figura 1.2 - Pormenor da flor de *Miscanthus x giganteus*

(www.santorosagardens.com)

1.1.2 Fatores edafo – climáticos

Em geral, o género *Miscanthus* é um grupo de plantas altamente resistentes contra diversos fatores edafo-climáticos. Esta planta evoluiu em regiões do mundo onde existem grandes flutuações de temperatura entre o verão e o inverno. Sendo que esta evolução levou ao desenvolvimento de características que tornam a planta resistente ao calor, geada, seca e inundação, embora as suas produtividades de biomassa possam variar em condições diferentes, dependendo da região e do clima (El Bassam, 2010).

As temperaturas às quais esta planta se dá melhor ou pior e a tolerância dos seus rizomas ao frio dependem do local e do genótipo de cada planta. A temperatura durante a estação de

crescimento tem um grande efeito sobre a produtividade da cultura de *Miscanthus*, porque o *Miscanthus* usa a via C4 para realizar a fotossíntese, que é mais eficiente a elevadas temperaturas e intensidades de luz.

Existem estudos que indicam que a temperatura letal poderá ser de - 3,4°C para genótipos de *Miscanthus x giganteus*. Com a presença de uma gema em torno do ponto de crescimento, e gemas latentes nos rizomas sob o solo, o *Miscanthus* é capaz de tolerar as geadas de primavera. A temperaturas inferiores a - 5°C, normalmente os rebentos em desenvolvimento e as folhas são destruídas. (Davies *et al.*, 2011)

Embora esta cultura prefira climas mais quentes, alguns estudos indicam que pode ser cultivada em toda a Europa, com bons resultados. Isso tem sido possível devido ao conhecimento mais profundo da interação entre o clima e a variabilidade genética da cultura (Jørgensen, 2010). Os *Miscanthus* desenvolveram-se em regiões do Mundo que apresentam elevadas flutuações de temperatura entre o Verão e o Inverno. Esta evolução levou ao desenvolvimento de características que tornam a planta capaz de realizar a fotossíntese a baixas temperaturas, resistindo ao frio, em contraste com outras plantas em C₄ conhecidas (El Bassam, 1998).

Geralmente, a plantação deve ser efetuada quando as temperaturas do solo são superiores a 10°C, de modo a evitar as geadas da primavera e não deverá ser tardia, para garantir um bom estabelecimento das plantas, o seu crescimento e a translocação das reservas para os rizomas, antes do inverno (Fernando, 2005).

Normalmente, esta cultura não cresce sob temperaturas abaixo dos 6°C, e consequentemente a duração do tempo de crescimento é superior a algumas plantas. As geadas que poderão ocorrer durante a primavera podem destruir a folhagem e consequentemente reduzir a duração da estação de crescimento, o que se torna um grande transtorno para a cultura (Best practice guidelines, 2007).

O vento também desempenha um papel importante no sucesso desta cultura. Antes das hastes poderem lenhificar existe a possibilidade de ventos fortes poderem derrubar os caules e/ou danificar as folhas. Sendo assim, é necessário abrigar a colheita do vento para reduzir o arrefecimento da cultura, que também pode impedir o crescimento da planta. (El Bassam, 2010).

A quantidade de água é um fator muito importante na produtividade destas plantas, influenciando algumas das suas características, tais como a altura, o número de folhas e o índice de área foliar (Christian e Haase, 2001). A eficiência da utilização de água da cultura de *Miscanthus x giganteus* é elevada em comparação com a maioria das outras culturas devido à sua alta produtividade (Clifton-Brown e Lewandowski, 2000; Fernando, 2005; El Bassam, 2010).

A precipitação anual e a retenção de água pelo solo vai influenciar fortemente o rendimento desta cultura em qualquer local. O *Miscanthus* possui uma boa eficiência de utilização da água, baseado na quantidade de água necessária por unidade de biomassa e as raízes desta cultura podem penetrar e extrair a água necessária até uma profundidade de cerca de 2m. Para além disso, a densa cobertura desta planta, ajuda a que 20 a 30% da precipitação seja interceptada pelas folhas e evaporada pelas mesmas, nunca chegando a atingir o solo. A maior ou menor disponibilidade de água no solo irá influenciar o rendimento potencial da colheita, significando uma perda de cerca de 90 kg de biomassa por hectare por cada milímetro de deficiência hídrica. Em muitos casos não se justifica a irrigação. Em tempos de seca severa, a folhagem de *Miscanthus* irá apresentar em primeiro lugar um enrugamento da mesma e depois vai morrendo desde a ponta até ao centro. Este aspeto irá reduzir o rendimento no ano de seca, mas realizados alguns estudos, verificou-se que a colheita sobrevive sempre e volta a crescer no ano seguinte. (Best practice guidelines, 2007)

Os teores de humidade estão correlacionados com a resistência à geada, na maioria dos casos. Por exemplo, na Alemanha, o solo é muito rico em húmus, e sendo assim, são capazes de hibernar a temperaturas mais baixas que - 21°C, sem problemas. Alguns genótipos de *Miscanthus* provaram ser capazes, de resistir durante várias semanas, a um inverno com temperaturas inferiores a - 40°C. (Atkinson, 2009; Davies *et al.*, 2011)

A primeira ocorrência de geada representa o fim da estação de crescimento para o género *Miscanthus*, no Norte da Europa. É nessa altura que a época de senescência é acelerada, e os nutrientes são sequestrados nos rizomas e a planta começa a secar. No Sul da Europa, após a florescência, os caules começam a lenhificar, a planta começa a secar e é acelerada a senescência da cultura (Agosto-Setembro). (Fernando e Oliveira, 2005)

Para alguns genótipos, uma maior quantidade de água disponível, significa uma maior produção de matéria seca. Solos mais húmidos produzem mais raízes, mas um menor número de rizomas em comparação com solos secos, sendo o menor número de rizomas atribuído às inundações. A longo prazo, a insuficiência dos rizomas poderá levar à incapacidade das culturas para se manterem. Genótipos diferentes têm eficiências de uso da água diferentes. Sendo que as plantas mais verdes parecem fazer um uso mais eficiente da água disponível, e tal, é provável que venha a ser muito importante para o melhoramento adicional da cultura de *Miscanthus*. (Atkinson, 2009; El Bassam, 2010).

A necessidade em água da cultura de *Miscanthus x giganteus* é inferior à do salgueiro ou do álamo, mas é mais elevada do que a de culturas de cereais como o trigo, devido principalmente ao seu maior tempo de crescimento. Em climas secos, tal requer cuidados quanto à localização e tamanho das áreas plantadas, para não haver problemas de défice hídrico (Clifton-Brown e Lewandowski, 2000; Fernando *et al.*, 2010c). No entanto em zonas húmidas, com elevados níveis de precipitação, a plantação de culturas que associam um uso de água moderado (como o *Miscanthus*) ou elevado, com uma elevada capacidade de infiltração (como a maioria dos

sistemas perenes, incluindo o *Miscanthus*), pode ajudar no controlo de áreas inundadas (Fernando *et al.*, 2010c).

A cultura de *Miscanthus* não é muito exigente no que diz respeito às condições do solo, facto demonstrado pela sua capacidade de crescer em diversos tipos de solo (El Bassam, 2010). Solos argilosos têm demonstrado ser os solos prediletos para o crescimento desta cultura. Para que haja crescimento desta cultura em solos arenosos e muito pedregosos, é necessário que haja precipitação suficiente. Um bom rendimento também foi registado em solos bem drenados com elevada quantidade de húmus. (Fernando, 2005; Jørgensen, 2010; El Bassam, 2010)

As culturas de *Miscanthus* têm também apresentado rendimentos elevados sobre uma gama de solos constituída principalmente por areia e com elevados teores de matéria orgânica (Best practice guidelines, 2007).

Para que a cultura se possa estabelecer em abril e maio é necessário que o solo esteja suficientemente arejado e que tenha uma estrutura fina, tornando assim os solos com uma camada superior a 25% de argila, provavelmente inadequado. O solo deve também ser capaz de suportar máquinas agrícolas durante a colheita. Tal facto, faz com que solos molhados e turfosos sejam inadequados para a cultura de *Miscanthus*. É recomendado para esta cultura, solos com cerca de 70 a 95 milímetros de água disponíveis por 0,50 m de profundidade do solo. (Clifton-Brown e Lewandowski, 2000; El Bassam, 2010)

É uma cultura de sistema radicular profundo, com raízes que podem atingir mais de 1,0 m de profundidade. Tal conduz à preferência destas plantas para solos mais profundos como por exemplo os que existem em planícies e vales. A textura do solo, a cor e o pH também podem afetar a taxa de crescimento do *Miscanthus*, sendo que este cresce mais rapidamente em solos mais escuros e de textura mais leve (El Bassam, 1998, Fernando, 2005).

Dados da Dinamarca sugerem que o intervalo ótimo de pH situa-se entre os 5,5 e os 7,5, para um melhor desenvolvimento desta cultura. Isto exclui solos muito ácidos para crescimento de *Miscanthus*. Os solos salinos não são preferenciais ao crescimento desta cultura, apesar de alguns genótipos tolerarem algum teor de sal (até 1%), mas o crescimento da planta e a produção de biomassa são diminuídos. Quando os genótipos são inoculados com bactérias simbióticas fixadoras de azoto, a tolerância à salinidade é aumentada. (Fernando, 2005; El Bassam, 2010; Jørgensen, 2010).

1.1.3 Nutrientes

As necessidades de nutrientes da cultura são geralmente consideradas baixas (Lewandowski e Schmidt, 2000; Kahle *et al.*, 2001; Foereid *et al.*, 2004; Fernando *et al.*, 2010c), embora os requisitos de azoto não sejam completamente compreendidos e havendo conflito aparente entre os resultados de vários estudos sobre o mesmo assunto.

A questão do azoto é uma questão particularmente importante, uma vez que o processo de fabrico de fertilizantes azotados e as perdas após a sua aplicação (N_2O gasoso e lixiviação de nitratos) têm impactos ambientais locais e globais significativos para o saldo de gases com efeito estufa e para os fenómenos de eutrofização (Biewinga e van der Bijl, 1996; Lewandowski e Kicherer, 1997; Lewandowski e Heinz, 2000; Lewandowski *et al.*, 2003; Fernando *et al.*, 2010b).

Um baixo conteúdo em matéria mineral, é desejável na biomassa destinada a conversão térmica, pois minimiza o impacto sobre a eficiência de combustão e reduz as emissões pelas chaminés das fábricas. Também reduz a remoção mineral na biomassa colhida, o que por sua vez pode reduzir os custos de produção futuros e, portanto, melhorar a sustentabilidade do produto (Biewinga e van der Bijl, 1996; Lewandowski *et al.*, 2003; Christian, 2008).

O sistema de rizoma perene permite que o conteúdo em nutrientes seja cíclico sazonalmente, dando-se a translocação entre a parte aérea e a parte rizomatosa e de raízes, o que permite minimizar possíveis adições de fertilizante, em anos posteriores (Fernando, 2005). Se a planta é colhida após a senescência, tendo ocorrido a translocação de nutrientes, o combustível resultante terá um baixo conteúdo mineral e, portanto, pouca libertação de poluentes, quando queimado (Lewandowski *et al.*, 2003)

Devido à fotossíntese ser realizada em C4 e quando ocorre a translocação de nutrientes para os rizomas antes da colheita, a eficiência de utilização de nutrientes do *Miscanthus* é elevada em comparação com outras culturas agrícolas (Lewandowski e Kicherer, 1997; Lewandowski *et al.*, 2003). No entanto, os altos rendimentos obtidos significam que quantidades significativas de nutrientes podem ser removidas no momento da colheita, embora isso varie de acordo com as condições climáticas e os genótipos utilizados (Christian, 2008).

Um estudo realizado indica que numa colheita do outono 150 a 250 kg N/ha (0,3 – 0,8% de N na matéria seca) foram registados, enquanto na colheita de primavera 17 a 100 kg N/ha (0,1 – 0,8% de N na matéria seca) foram registados. No entanto, a resposta de *Miscanthus giganteus* à fertilização por azoto é limitada, embora varie entre os vários locais (Jørgensen, 2010).

1.1.4 Espécies infestantes, doenças e pragas

É muito importante um controlo rigoroso das espécies infestantes tais como ervas daninhas, ao longo dos primeiros dois anos, uma vez que é nesta fase que os *Miscanthus* podem ser dominados por estas espécies (El Bassam, 2010). Após este período, a necessidade de cuidados é menor, devido à formação de uma camada, fechada e alta, que reduz a penetração da luz e, durante a senescência, ao manto de folhas na superfície do solo. A aplicação de herbicidas nas bermas da plantação pode constituir o máximo que é necessário fazer, após o estabelecimento da cultura (Christian e Haase, 2001).

Várias doenças e pragas têm sido registradas nesta cultura, mas não existem relatos na Europa de doenças que diminuam significativamente a produção da colheita e esta situação é diferente da de culturas de curta rotação como salgueiros e choupos; se futuramente, ocorrer uma plantação prolongada desta cultura, maior probabilidade de ocorrência de doenças é previsível sendo necessário uma avaliação contínua das doenças e pragas e uma boa monitorização desta cultura. Esta cultura pode ser um vetor de pragas e doenças perigosas para as culturas convencionais, como por exemplo para o milho. (Jørgensen, 2010; El Bassam, 2010).

1.1.5 Propagação

É importante o estudo das variações genéticas desta espécie para a sua conservação e utilização, e para serem criados novas variedades comercialmente mais desejáveis (Glowacka, 2011).

Esta planta é estéril, sendo a sua propagação realizada por via vegetativa, o que se torna dispendioso, por isso a colheita deve permanecer produtiva durante vários anos para que os custos de implantação possam ser recuperados. Acredita-se o que o *Miscanthus*, possa ser produtivo durante cerca de 15 a 20 anos (Christian, 2008).

Um problema é o elevado custo para estabelecer uma cultura de *Miscanthus*, dada a necessidade de propagação vegetativa. Outro problema é a ocorrência de danos pelo frio e principalmente durante o primeiro inverno após a plantação. (Fernando, 2005)

A cultura de *Miscanthus* pode propagar-se por várias vias. A propagação por semente, apesar de ser a forma mais económica tem diversas limitações nesta cultura por diversas razões, como por exemplo, o genótipo do *Miscanthus x giganteus* sendo um híbrido é praticamente estéril, não produzindo sementes em quantidades significativas (Fernando, 2005). Em alguns estudos foi testada a longevidade e resistência das sementes: os resultados mostram que o armazenamento em ambientes frios, a longo prazo, não parece ter efeitos negativos sobre a viabilidade das sementes férteis, mas a humidade diminui a sua viabilidade. Sendo que a capacidade de germinação de sementes armazenadas por cerca de 6 meses, é drasticamente reduzida. E em armazenamentos iguais ou superiores a 12 meses, observou-se que não existiu qualquer germinação nas sementes. A capacidade de germinação em sementes armazenadas em ambiente frio até 24 meses não foi afetada. Outro estudo, concluiu que o genótipo de *Miscanthus x giganteus* perdeu a capacidade de germinação das suas sementes, 6 meses depois de estas terem sido dispersas pelo vento. Em regiões frias, as sementes de *Miscanthus* têm uma elevada longevidade. (Christian *et al*, 2005)

Estudos relativos ao pH e à temperatura sobre a germinação das sementes, não revelaram preferências substanciais. Mas por outro lado, os resultados revelaram que os extremos de pH devem ser evitados e que a gama de temperaturas entre os 20 e os 30°C é a melhor. Um elevado stress hídrico tem sido comprovado com prejudicial ao crescimento das plantas (El Bassam, 2010). A profundidade da sementeira deve ser muito superficial devido ao pequeno

tamanho das sementes do *Miscanthus x giganteus*. Uma certa humidade é importante para a germinação e a sobrevivências das plantas jovens. Em condições normais as sementes germinam em cerca de 7 a 14 dias após a sementeira. (Christian *et al*, 2005)

A propagação por divisão é um processo lento mas é simples e rapidamente conduz a uma planta de grandes dimensões. As plantas são cultivadas, a partir de cortes que se fazem às plantas que já estão em desenvolvimento (El Bassam, 2010).

Os segmentos do caule deverão ser cortados entre o final de Julho e o final de Agosto, antes da florescência, sendo imediatamente plantados. Estes segmentos devem conter dois ou três nódulos, de preferência os dois primeiros da base do caule, uma vez que enraízam mais rapidamente (El Bassam, 1998). Ao fim de 4-6 semanas, desenvolvem-se as raízes e as plântulas jovens. É, no entanto, necessário garantir que estas plantas sobrevivam ao Inverno, preservando-as, por exemplo, em estufa (Fernando, 2005).

Os rizomas formam uma matriz interligada a cerca de 10-15 centímetros abaixo do solo. A propagação por corte e divisão dos rizomas tem a vantagem de que várias plantas podem ser produzidas a partir de uma única, mas por outro lado, é necessário tempo para se formar uma planta adulta. É atualmente recomendado, que em Novembro, as plantas com dois a três anos de idade sejam utilizadas para a divisão dos rizomas em comprimentos de 8-10 centímetros. Cortes de menor dimensão podem resultar em rizomas mais suscetíveis à morte durante o inverno. As estacas devem ser armazenadas entre -1°C e 1°C. Os ensaios que mais tiveram sucesso foram os que utilizaram estacas plantadas no início de Maio, a uma profundidade de 3-6 centímetros e a uma densidade de 10.000 rizomas por hectare. (El Bassam, 2010)

A micropropagação e cultura de tecidos, tem a vantagem de que um grande número de plantas pode ser produzido num curto período de tempo. Além disso, este método pode ser facilmente convertido em escala industrial de produção, sendo um método mais eficaz. A técnica desenvolvida, baseia-se na remoção do tecido do meristema das secções apicais inflorescentes, de plantas de *Miscanthus* selecionadas, o qual é depois desenvolvido em cultura. (Fernando, 2005) Existem estudos que indicam que as plantas micropropagadas são mais fortes do que as plantas propagadas naturalmente (El Bassam, 2010). No entanto, no primeiro ano, podem não produzir reservas metabólicas suficientes para sobreviverem ao inverno. Por esse motivo, a propagação por rizoma apresenta, geralmente, no primeiro ano, maiores percentagens de sobrevivência. (Fernando, 2005; El Bassam, 2010).

Para vários métodos de propagação, as plantas são normalmente pré-cultivadas em condições protegidas durante 2-3 meses e quando as plantas atingem uma altura de cerca de 30 centímetros, são em seguida, transplantadas para o campo. As plantas transplantadas, têm cerca de 30-35 centímetros de altura, pelo menos um rebento e raízes robustas e visíveis. (El Bassam, 2010)

Nos últimos anos tem havido um avanço significativo no que diz respeito à maquinaria utilizada na plantação de *Miscanthus*. Existem máquinas especializadas para a plantação de *Miscanthus*, existindo vários tipos de plantadores automáticos que podem estabelecer culturas entre 10 a 20 ha por dia, e que permitem que a densidade de plantação possa ser controlada. Esta maquinaria foi desenvolvida e é mais utilizada no Reino Unido (figura 1.3). (Best practice guidelines, 2007)



Figura 1.3 - Exemplo de máquina que permite a instalação de *Miscanthus* no solo

(Best practice guidelines, 2007)

1.1.6 Ciclo de crescimento

O crescimento destas plantas é simples. Produz novos rebentos anualmente e estes normalmente emergem do solo em fevereiro/março. Estes rebentos desenvolvem-se no sentido vertical, desenvolvendo-se caules robustos, que podem atingir 1 a 2 metros de altura até finais de agosto no ano de plantação, com um diâmetro de 10mm. A partir do final de julho/agosto as folhas começam a secar. A secagem das culturas acelera, após o retorno dos nutrientes ao rizoma, no outono. De seguida a maior parte da folhagem é perdida durante as primeiras geadas, e os caules secam até um baixo teor de humidade (30 a 50%) durante o inverno. Em fevereiro, quando a cultura já está praticamente desprovida de folhagem, as hastes da planta permanecem e são colhidas mecanicamente quando o seu teor de humidade baixa significativamente. Este ciclo de crescimento é repetido quando as temperaturas aumentam novamente. A partir da segunda estação em diante, a cultura esperada pode atingir uma altura

máxima de 2.5 a 3.5m. A cultura leva três/quatro anos para atingir um elevado rendimento. Após esta fase a cultura continuará a ser produtiva durante cerca de mais 15 anos (Fernando, 2005; Best practice guidelines, 2007). O ciclo de crescimento do *Miscanthus* é apresentado na figura 1.4.

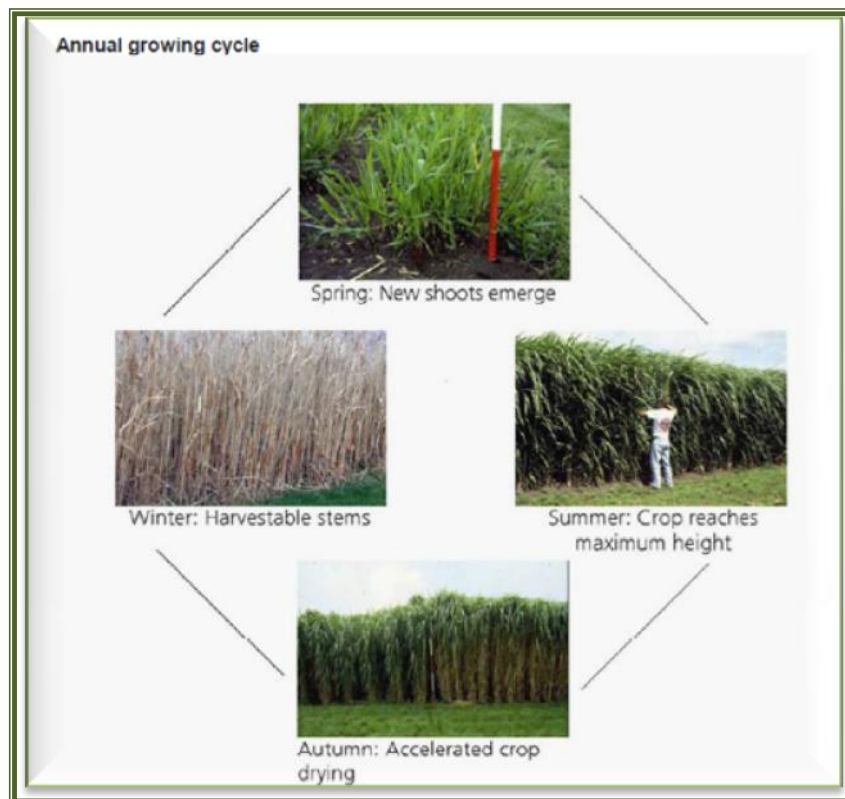


Figura 1.4 – Ciclo de crescimento do *Miscanthus*.

(Best practice guidelines, 2007)

1.1.7 Produtividade

As principais características da produtividade são a disponibilidade de temperatura, a luz solar e a quantidade de água disponível. A variabilidade destes fatores durante o crescimento das plantas resulta na variação anual dos rendimentos (Best practice guidelines, 2007). No espaço europeu a produtividade da cultura é variável, de 9-27 Mg/ha (Fernando, 2005). No Norte da Europa, a maior limitação reside na capacidade de sobrevivência dos rizomas ao primeiro Inverno, devido às temperaturas negativas do solo e quando os rizomas não são capazes de acumular reservas metabólicas suficientes (Fernando e Oliveira, 2005). No Sul da Europa, o factor limitante é a água (Fernando e Oliveira, 2005).

O rendimento desta cultura após a primeira estação, pode ser de 1 a 2 Mg/ha, que é um valor que aponta que a colheita do material não deve ser realizada. As hastes não precisam de ser cortadas e podem ser deixadas no campo até à temporada seguinte. No entanto, se forem aplicados herbicidas durante a estação da primavera, as hastes devem ser cortadas a fim de

reduzir o risco de absorção pela cultura. A partir do segundo ano, e desse em diante, a colheita poderá ser colhida anualmente, se o rendimento da cultura for suficiente. Os rendimentos que se podem obter a partir do segundo ano, podem variar geralmente entre 4 a 10 Mg/ha e a partir do terceiro ano poderão variar entre 10 a 13 Mg/ha ou mais. As razões para os diferentes valores de rendimentos na fase de produção e crescimento dependem da densidade da plantação, do tipo de solo e do clima (Best practice guidelines, 2007).

1.1.8 Colheita

Uma colheita de biomassa ideal é caracterizada por atributos que lhe permitem fornecer alto teor energia a partir de um baixo *input* de matéria-prima.

A colheita de biomassa deve exigir apenas investimentos baixos de energia (combustíveis fósseis) e económicos, se o seu objetivo é ser ambiental e comercialmente viável, fornecendo assim um combustível sustentável do ponto de vista ambiental e comercial (Heaton *et al*, 2010).

Quanto menor for o teor em humidade, menor será a necessidade de secagem, sendo assim, a colheita deverá ser realizada quando o teor em matéria seca for elevado e quando a maior parte dos nutrientes se encontrarem sequestrados nos rizomas. Estes nutrientes em reserva, permitem que os rizomas sobrevivem ao inverno, assegurando o crescimento das novas plantas na primavera (Fernando e Oliveira, 2005).

A data da colheita depende sobretudo das condições climáticas do local de cultivo. O menor teor em humidade dos *Miscanthus*, nos países do Sul da Europa (25-40%), facilita a implementação da colheita no Outono. No Centro e Norte da Europa, a colheita é geralmente efectuada entre Janeiro e Março, antes dos rizomas iniciarem um novo crescimento, apresentando um teor em matéria seca de 40-70% (Fernando, 2005). Quanto mais tardia é a colheita, mais seco é o material. Para produção de energia, um material mais seco é preferível. No entanto, é necessário cuidado na colheita de modo a não perturbar a nidificação de aves. (Best practice guidelines, 2007)

Depois de realizada a colheita com uma máquina própria, a cultura é enfardada e compactada. Existem vários tipos de prensas, cada uma produzindo um tipo de fardo diferente (por exemplo, rolos retangulares redondos ou compactos), adequados para diferentes tipos de combustão para produção de energia (figura 1.5). (Best practice guidelines, 2007)



Figura 1.5 – Exemplos de máquinas de enfardamento do *Miscanthus*.

(Best practice guidelines, 2007)

1.1.9 Armazenamento

Esta cultura pode ser armazenada de diversas formas, tais como pilhas, fardos etc. Sendo armazenada a céu aberto, deve-se ter vários cuidados, tais como: as pilhas devem ser instaladas longe das vias públicas e o mais compactado possível para reduzir o risco de incêndio; longe de linhas elétricas; longe de zonas residenciais. Os fardos devem ser cobertos para limitar as perdas de degradação e de biomassa e manter o combustível seco. Os rendimentos variam de acordo com a idade da cultura e de fatores ambientais específicos para os diferentes locais. (Best practice guidelines, 2007).

1.1.10 Utilizações do *Miscanthus*

A sua utilização para produção de energia tem um elevado potencial para substituir a produção de energia a partir dos combustíveis fósseis, e para diminuir as emissões de gases de efeito de estufa, podendo assim, oferecer uma solução sustentável para atender às políticas relacionadas com o clima e com a energia, especialmente se o cultivo for efetuado em terras degradadas minimizando a concorrência com as culturas alimentares e com os interesses diretos e indiretos de desmatamento associado à produção de biocombustíveis. (Fernando, 2005; Dauber *et al.*, 2012). Este potencial é atribuído a uma elevada produtividade e devido à sua característica perene que a longo prazo apresenta baixos requisitos mecânicos de cultivo e de recursos durante um ciclo de vida da cultura (Acaroglu e Aksoy, 2005).

Os *Miscanthus* têm sido utilizados principalmente na produção de energia e na produção de pasta de papel, mas este material tem vindo a ser cada vez mais explorado para outras utilizações, como por exemplo painéis de fibra de média densidade, materiais compósitos, leito para animais, devido à sua elevada estabilidade, à sua robustez e ao peso reduzido dos seus caules (Fernando, 2005).

O *Miscanthus* tem sido muito utilizado para fins energéticos devido à sua elevada capacidade calorífica. A combustão de *Miscanthus*, para produção de calor e/ou para geração de electricidade, é um processo que já está implementado a nível industrial e comercial. No Norte da Europa, em particular na Dinamarca e no Reino Unido, o *Miscanthus* tem sido utilizado na co-combustão com carvão, e como substituto da palha, em centrais termoeléctricas (Fernando, 2005). No Reino Unido, a tem contratos com os produtores para queimar não só palha de cereais mas também *Miscanthus* (Fernando, 2005). No verão de 2010, a Central Energética a biomassa de 35 MW de Ely, Cambridge, Reino Unido (a maior do mundo a utilizar palha), estava a ser alimentada com mistura de palha e *Miscanthus* (50:50) (Jørgensen, 2010). A cultura de *Miscanthus* também tem sido estudada em ensaios de gasificação e pirólise, como biocombustível de segunda geração para produção de etanol e na produção de hidrogénio (Cipriano, 2010).

1.1.11 Aspectos ambientais da produção e utilização de *Miscanthus*

A produção de culturas energéticas deve ser estudada e avaliada em termos do seu impacto ambiental, a fim de contribuir para um desenvolvimento agrícola sustentável. Como vectores de energia, as culturas energéticas oferecem vantagens ecológicas sobre os combustíveis fósseis, contribuindo para a redução de gases de efeito estufa e emissões acidificantes. No entanto, pode haver riscos relacionados com a intensidade da produção agrícola, nomeadamente emissões de poluentes para a água, solo e ar, ou a redução da diversidade biológica e da paisagem. (Venturi e Venturi, 2003)

As culturas perenes, como o *Miscanthus*, requerem menos fertilizantes do que as culturas anuais, um aspeto positivo em termos ambientais e económicos (Zegada-Lizarazu *et al*, 2010; Boléo, 2011). Diversas características podem explicar este comportamento no caso do *Miscanthus*: a cultura pode utilizar o azoto orgânico de bactérias fixadoras de azoto, livres ou associadas ao sistema radicular; os nutrientes são reciclados pelo sistema radicular, sendo translocados da fracção aérea para a radicular no final do ciclo de crescimento, e remobilizados na primavera para o recrescimento; o seu extenso sistema radicular pode imobilizar os nutrientes, contribuindo para o aumento da eficiência do seu uso (Jørgensen, 2010; Picco, 2010). A interceção dos nutrientes pelo sistema radicular associa as culturas perenes, como o *Miscanthus*, à sua implementação em áreas vulneráveis à poluição por nitratos e como faixas de protecção em sistemas agrícolas tradicionais, ao tratamento de águas residuais e de lixiviados de aterros (Boléo, 2011). A menor exigência das perenes, como o *Miscanthus*, em P e K, resulta também num menor impacto quanto à exploração dos recursos minerais (de fosfatos e de potássio), embora a diferença para a maioria das culturas energéticas anuais não seja significativa (Fernando *et al.*, 2010b).

As culturas perenes geralmente requerem também menos pesticidas do que as culturas anuais, uma vez que a utilização de herbicidas ocorre somente durante a fase de instalação da

cultura, no primeiro ano, ao passo que as culturas anuais requerem aplicações anuais (Zegada-Lizarazu *et al*, 2010). Os efeitos benéficos são as quotas decrescentes de produtos químicos que escoam para as águas subterrâneas e águas superficiais (Picco, 2010). Além disso, no caso dos *Miscanthus*, esta cultura não requer a aplicação de medidas de proteção de plantas adicionais, dado que não apresenta doenças graves (Fernando *et al*, 2010a; Boléo, 2011).

As atividades de gestão do cultivo e as características das culturas podem afetar a qualidade do solo (regime de nutrientes, matéria orgânica, estrutura, pH, potencial de erosão, entre outros) (Biewinga e van der Bijl, 1996). No caso dos *Miscanthus*, verifica-se um balanço neutro do regime de NPK aplicado na fertilização (Fernando *et al*, 2010b), o que é benéfico: a desnutrição da planta e o depauperamento dos solos é limitada, não se observando uma acumulação de nutrientes no solo, o que no caso do azoto e do potássio poderia resultar em efeitos a nível da eutrofização das águas e solos (Fernando *et al*, 2010b e c).

Uma cultura perene como o *Miscanthus* que apresenta sistemas radiculares profundos e densos, que de forma contínua permanecem no solo, que apresenta também uma elevada cobertura de superfície por um período de tempo alargado, que necessita de menor revolvimento do solo e de uma correcção do solo menos intensa (face aos sistemas anuais), apresenta uma maior interceptação da água da chuva, reduzindo o potencial de erodibilidade e de escoamento, contribui para o aumento da matéria orgânica do solo nas suas camadas superficiais e para a redução da compactação do solo, assim como no que diz respeito ao pH do solo, se tenha verificado que os sistemas de plantas perenes herbáceas, não afectam o estado nativo do solo (Fernando *et al*, 2010b). Estas características dos *Miscanthus* indicam que esta cultura contribui também para o aumento do sequestro de carbono no solo (Boléo, 2011).

Em relação ao uso de recursos hídricos, diversos estudos indicam que os sistemas de culturas perenes podem contribuir para a minimização dos impactes decorrentes. De acordo com Boléo (2011), o elevado conteúdo em lenhina e celulose das plantas perenes, permite que as plantas permaneçam de pé mesmo com teores de água reduzidos e estas culturas apresentam uma elevada eficiência no uso da água devido ao seu sistema radicular profundo e bem desenvolvido. Por outro lado, o sistema radicular longo e profundo pode retardar a recarga dos aquíferos.

Em comparação com um sistema natural, mesmo o pousio, qualquer cultura energética terá efeitos negativos face à diversidade biológica e da paisagem. No entanto, as culturas herbáceas perenes podem adicionar diversidade à paisagem e aos habitats, devido às suas características estruturais (Boléo, 2011): a reduzida perturbação do solo a longo prazo, a colheita tardia e a produção livre de insecticidas, permite um aumento das populações de microrganismos e a formação de sistemas associativos; verifica-se no caso das culturas de

Miscanthus um aumento da microfauna do solo, da flora, e da fauna do solo e de espécies de aves em relação ao cultivo de cereais, por exemplo (Fernando *et al.*, 2010c).

As estratégias de redução dos impactes decorrentes do cultivo de *Miscanthus* são limitadas às opções de manejo da cultura, que podem influenciar as emissões, o regime nutricional e a utilização de recursos minerais. Todos os outros aspectos ambientais são específicos do local e dependentes das características da cultura. Portanto, a implementação de agrossistemas bioenergéticos com menores impactos deve ser sustentada pela adequação entre a cultura a implementar e a localização (por exemplo, culturas exigentes em água devem ser implementadas em regiões com maior precipitação / recursos hídricos).

1.2. Proposta de estudo

Uma das tecnologias que pode ser utilizada, em Portugal, no sentido de diminuir a dependência energética exterior, é o uso de biomassa para produção de energia. A utilização de biomassa apresenta benefícios pois pode contribuir para a diminuição das emissões de agentes poluentes para o ambiente, especialmente CO₂, para além de contribuir para a diminuição da utilização de recursos fósseis.

A utilização da planta de *Miscanthus* pode ser um bom exemplo de biomassa para produção de energia. Esta cultura tem inúmeras vantagens tais como elevadas taxas de fotossíntese, elevada taxa de fixação de dióxido de carbono, elevadas taxas de rendimento, entre outras, tal como foi abordado na descrição da planta no ponto anterior.

Sendo assim este trabalho tem como principal objetivo o estudo da influência do manejo da cultura no balanço energético do cultivo, processamento e utilização de *Miscanthus* na produção de energia. Pretende-se, nomeadamente, estudar o efeito da data de colheita dos *Miscanthus* e da altura a que é realizado o seu corte no balanço energético do cultivo do *Miscanthus*, processamento sob a forma de pellets e sua utilização em salamandras (por combustão). Paralelamente, estudar-se-á também a influência do manejo da cultura no impacto ambiental da produção de energia, nomeadamente nos aspetos relativos às emissões de azoto derivadas do cultivo, processamento e utilização dos *Miscanthus* para energia.

2. Metodologia

O principal objetivo deste trabalho é o de estudar a influência da data de colheita do *Miscanthus* e da altura a que é realizado o corte, no balanço energético do cultivo, processamento e utilização de *Miscanthus* para produção de energia.

Neste contexto estudaram-se três diferentes datas de colheita: A) colheita em setembro; B) colheita em novembro; C) colheita em janeiro. Para cada data de colheita consideraram-se diversas hipóteses associadas à altura a que o corte é efetuado: 1) totalidade do caule, desde a base até ao topo; 2) corte efetuado a cerca de 25 cm do solo, deixando no solo a fração de caule de 0-25cm, pois esta é mais rica em material mineral e nutrientes; 3) corte efetuado no topo do caule a cerca de 200cm do solo, deixando esta fração de topo no solo, uma vez que é uma fração muito rica em material mineral e nutrientes, seguindo-se o corte na base da planta, com aproveitamento dos caules com alturas desde a base até aos 200 cm; 4) corte efetuado no topo do caule a cerca de 200cm do solo, deixando esta fração de topo no solo, seguindo-se o corte a cerca de 25 cm do solo, com aproveitamento dos caules com alturas desde os 25 cm do solo até aos 200cm. A figura 2.1 mostra estes quatro cenários associados à altura do corte.

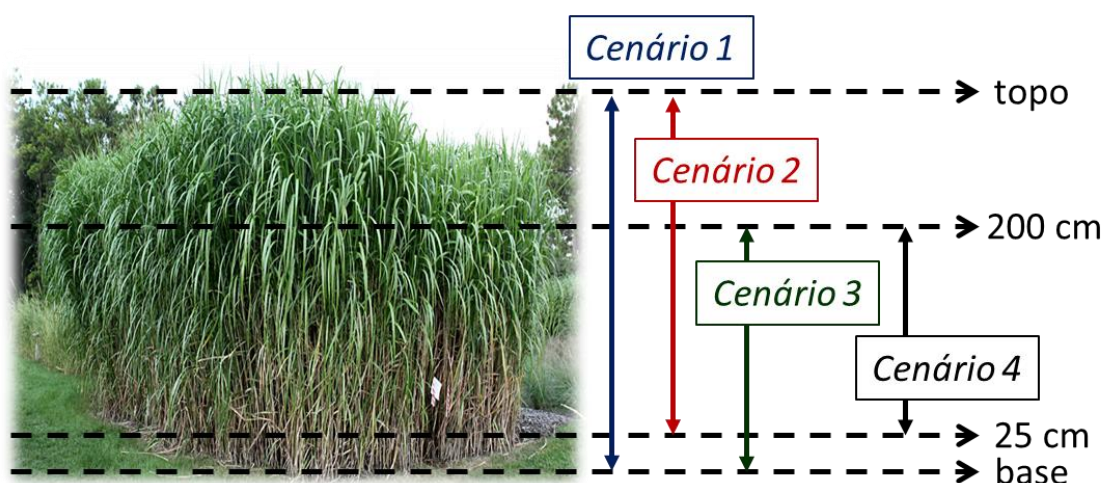


Figura 2.1 – Cenários associados à altura do corte da cultura de *Miscanthus*
(Cenário 1: base-topo; Cenário 2: 25cm-topo; Cenário 3: base-200cm; Cenário 4: 25-200cm)

Na produção de energia, considerou-se a combustão da biomassa, por ser o processo que já se encontra implementado a nível industrial e comercial. O cenário escolhido para a combustão é o sistema doméstico de combustão de pellets de *Miscanthus*, em que as pellets são produzidas numa unidade transformadora situada na fronteira da exploração agrícola.

Este estudo seguiu a abordagem sugerida por Biewinga e van der Bijl (1996) e Fernando *et al* (2010c), tendo-se estudado o balanço energético e diversos indicadores do impacte associado

ao cultivo e utilização da cultura de *Miscanthus*, nomeadamente os relacionados com as emissões de azoto.

Numa primeira fase, pretende estudar-se a influência da data de colheita do *Miscanthus* e da altura a que é realizado o corte, no balanço energético, da sua produção e utilização para energia. Nesta primeira fase, considerou-se o ciclo de vida da cultura desde a sua plantação até ao seu processamento e utilização num sistema doméstico de combustão de pellets de *Miscanthus*, em que as pellets são produzidas numa unidade transformadora situada na fronteira da exploração agrícola.

Numa segunda fase, pretende estudar-se o impacte associado ao cultivo e utilização dos *Miscanthus* nas emissões de azoto, através da análise da interação do manejo da cultura e práticas de gestão com o ambiente circundante. As categorias estudadas incluem as emissões para o solo, água e ar.

Como a cultura é perene, considerámos que a sua produção teria uma duração de 15 anos. Considerou-se o intervalo de tempo de 15 anos, uma vez que a cultura é perene e são necessários mais gastos de energia nos anos de instalação da cultura do que nos anos em que a planta já atingiu o seu estado de maturidade. Mas o balanço energético é também calculado por ano, o que permite a comparação com os sistemas de culturas energéticas anuais. Neste caso, o consumo energético de processos que ocorrem pontualmente (caso da propagação das plântulas e sua instalação no campo) será distribuído pela duração da plantação (que se assume como sendo igual a 15 anos).

Em todos os cálculos utilizámos como unidade funcional 1 ha de produção de *Miscanthus* por ano. Utilizámos como unidade funcional o hectare de solo uma vez que pretendemos associar a disponibilidade energética do sistema *Miscanthus* que se consegue obter por unidade agrária de solo, o que nos pode permitir fazer comparações com outros sistemas agrários, com outras culturas. Essa comparação, por unidade agrária de solo, pode fornecer-nos boas indicações do melhor uso de solo. Para a realização deste estudo, foi necessário ter em linha de conta alguns aspetos, nomeadamente dados respeitantes à implementação de plântulas no terreno, à produtividade, ao uso de fertilizantes e pesticidas, ao uso de água e à caracterização da biomassa. Estes dados foram obtidos no trabalho de Fernando (2005) de campos de *Miscanthus* localizados no *Campus* da FCT/UNL, do Monte de Caparica.

2.1 Balanço energético

O balanço energético é calculado por subtração do consumo energético à energia potencial produzida, sob a forma de biomassa. Para o cálculo do balanço energético foram incluídos todos os passos desde a propagação das plantas e preparação dos campos até à colheita e transporte da biomassa e seu processamento. O consumo energético é a soma dos gastos energéticos utilizados na produção das plântulas, dos fertilizantes, pesticidas, assim como na utilização de maquinaria, no cultivo dos *Miscanthus*. O consumo energético reflecte também os

gastos utilizados no armazenamento, transporte e processamento da biomassa. A energia produzida corresponde à energia potencial total que se poderá obter por combustão das plantas, que corresponde ao produto Produtividade ($t \cdot ha^{-1}$) x Calor de combustão. A este valor é multiplicado o rendimento energético da máquina.

Inicialmente será gasta uma certa quantidade de energia na propagação das plântulas, no seu transporte até ao campo, na preparação do campo e na colocação das plântulas em campo. A energia gasta neste conjunto de ações será agrupada e designada por “**plântulas**”.

Devido à sua característica híbrida, o *Miscanthus x giganteus* não forma sementes férteis. Propaga-se pela divisão dos rizomas ou *in vitro* ou através de micro-propagação. A micro-propagação é o método mais comum usado e a comercialização dos *Miscanthus* assentam neste método. O primeiro passo na micro-propagação é a indução *in vitro* de culturas estéreis. De seguida as plantas são multiplicadas num meio de perfilhamento. Um ciclo de multiplicação demora 4 semanas. As plântulas crescem em estufas durante 6 – 8 semanas a uma temperatura de 20 – 25° C antes de serem plantadas nos campos. A energia necessária à propagação das plantas, varia consoante a região, uma vez que o combustível consumido para aquecer a estufa depende diretamente da temperatura predominante. Assume-se que o consumo de energia do período de multiplicação é igual ao do período de crescimento das plantas. No caso de estudo, assume-se que as plântulas poderiam ser produzidas em estufas em Portugal.

A energia associada ao transporte das plantas, depende da distância da estufa até ao campo de *Miscanthus*, da capacidade de carregamento do camião e do seu consumo de combustível. Neste caso, assumiu-se que a distância entre a estufa e o campo seria, no máximo de 100 km.

Após o transporte para o campo, é necessário preparar o campo para colocação das plântulas. Nesta preparação, os passos necessários são arar e gradar. Após a preparação do terreno, o *Miscanthus* pode ser plantado.

Em Portugal, a plantação pode ser realizada desde o meio de Março até ao princípio de Maio, desde que a temperatura do solo seja superior a 10°C. A plantação pode ser feita com máquinas convencionais. Foi assumido que a densidade de plantação seria de 4 plantas por m^2 , e que o período de vida seria de 15 anos.

De acordo com Lewandowski *et al.* (1995), a energia total necessária para a propagação, transporte e plantação das plântulas (incluindo a preparação do terreno) é de $3,3 \text{ GJ} \cdot ha^{-1}$, para uma densidade de plantação de 2 plântulas por m^2 . Portanto, na situação em estudo, considerou-se que seria necessário o dobro da energia, ou seja, $6,6 \text{ GJ} \cdot ha^{-1}$.

A necessidade de adição de fertilizantes é calculada baseada no rendimento esperado e no teor de nutrientes do material vegetal colhido. Comparado com outros materiais como por exemplo a palha, o teor de nutrientes minerais nos *Miscanthus* é mais baixo, devido à translocação dos nutrientes minerais da parte aérea para os rizomas no final do ciclo

vegetativo. Os ensaios em campo mostraram que 60kg de azoto no 1º ano e seguintes, são suficientes para cobrir a procura de azoto do *Miscanthus*. Uma dose anual de fertilizante de 140kg K e a aplicação no 1º ano e no 11º ano de 100kg P/ha cobre totalmente a procura das plantas por potássio e fósforo. (Fernando, 2005)

A **produção de fertilizantes** envolve um consumo energético que tem de ser contabilizado. A produção de fertilizantes azotados é o processo energeticamente mais intenso. Para a produção de 1kg de azoto, são necessários 38,6MJ (Melman *et al*, 1994). O superfosfato (fertilizante fosfatado utilizado nos campos) é principalmente obtido em minérios provenientes do norte da África, sendo necessários 7,6 MJ/kg P para a sua extração e comercialização (Melman *et al*, 1994). A mineração do potássio requer menos energia do que a mineração do fósforo, uma vez que os depósitos estão mais próximos da superfície terrestre, sendo necessários 3,0 MJ/kg K para a sua extração e comercialização (Melman *et al*, 1994). O consumo energético associado à produção de fertilizantes inclui todos os gastos da sua fileira.

Os parâmetros respeitantes à mecanização, uso e produção de energia, uma vez que não foram diretamente determinados, foram estimados com base em dados obtidos na literatura. Considerou-se que a exploração agrícola se localizaria perto da barragem do Alqueva, uma vez que esta região possui características climáticas que permitem antever o estabelecimento desta cultura com sucesso. A barragem possibilita, por sua vez, o fornecimento de água para a irrigação.

O **controlo das ervas daninhas** é apenas necessário no 1º ano após a plantação. De acordo com Lewandowski *et al*. (1995), são gastos cerca de 96 MJ.ha⁻¹ neste controlo mecânico. A partir do 2º ano, o *Miscanthus* é suficientemente competitivo para se sobrepor às ervas daninhas, não sendo necessário o controlo mecânico. Atualmente não são conhecidas pragas que se tenham tornado relevantes relativamente ao *Miscanthus*. Sendo assim, não tem sido necessário a aplicação de pesticidas. (Fernando, 2005)

Ao longo dos anos, o **trabalho mecânico** envolvido na produção agrícola de *Miscanthus*, consome uma certa quantidade de energia. Esse trabalho mecânico corresponde à energia consumida na aplicação dos fertilizantes e na limpeza do campo após a colheita, correspondendo a um valor de 348 MJ.ha⁻¹. No 1º ano, a este valor é adicionado o consumo associado ao controlo das ervas daninhas (96 MJ.ha⁻¹). No último ano (15º) é necessário remover os rizomas do solo, o que consome 154 MJ.ha⁻¹ adicionais. (Lewandowski *et al*., 1995)

Depois da plantação é necessário **irrigar**. De acordo com Fernando (2005) no 1º e 2º anos a rega deve ser mais intensa, para garantir o correto estabelecimento dos rizomas e para evitar o stress hídrico, sendo necessária uma aplicação de 680mm de água no período de Junho a Agosto. No 3º ano e seguintes, é necessária apenas uma adição de 350 mm no período de Junho a Agosto. De acordo com Acaroglu e Aksoy (2005), a energia consumida por cada m³ de água de rega, equivale a 1,02 MJ. Assumiu-se que nesta situação, em Portugal, se utilizaria o mesmo tipo de equipamentos de rega com o mesmo tipo de consumo energético.

O trabalho mecânico envolve também a **colheita**. Como já referido, assumimos que a colheita pode ser efetuada em três datas diferentes: setembro, novembro e janeiro. No estudo, considerámos o valor energético associado a este consumo idêntico para os diferentes cenários embora a colheita seja realizada de maneira diferente. Considerando, em cada data de colheita, o Cenário 1 e 2, em que a máquina efectua apenas um corte, mas a diferentes alturas do solo (base e 25 cm), a biomassa é colhida numa máquina que ceifa e tritura para um vagão, consumindo $2,7 \text{ GJ.ha}^{-1}$ (Lewandowski *et al.*, 1995). Em cada data de colheita, nos Cenários 3 e 4, considerámos que a energia consumida na ceifa e trituração é a mesma, consumindo $2,7 \text{ GJ.ha}^{-1}$, uma vez que já estão disponíveis no mercado, máquinas que conseguem na mesma “corrida” cortar o topo dos caules (fração superior a 200cm), deixando-os no solo, e cortar os caules ou na base (Cenário 3) ou a 25 cm do solo (Cenário 4), recolhendo estes caules e triturando-os para um vagão (e.g. a marca Claas já disponibiliza estas máquinas). A pelletização dos caules na unidade transformadora situada na fronteira da exploração agrícola, consome uns adicionais $0,018 \text{ GJ}$ por tonelada de matéria seca (Lewandowski *et al.*, 1995). No estudo, assume-se que a cultura só atinge o seu estado de maturação a partir do 3º ano, tal como indicado por Fernando (2005). Por este motivo, assume-se que só a partir do 3º ano é que os caules seguem para a pelletização e comercialização. Nos dois primeiros anos, os caules colhidos permanecem no terreno.

De acordo com Fernando (2005), a humidade das plantas de *Miscanthus* colhidas em setembro (40-54%), é maior do que a das plantas colhidas em novembro ou em janeiro (30-40%). No entanto, considerou-se que a biomassa apresentava quer em setembro, quer em novembro e janeiro, um teor de matéria seca suficiente para a pelletização, não sendo necessário um processo adicional de secagem da biomassa.

No transporte, tem de se calcular a energia despendida entre o local de produção e a sua conversão em energia (calor). É considerada a ida em separado da volta. Na ida considera-se que o camião vai carregado com a biomassa com humidade (cerca de 10%, pellets). Na volta, o camião retorna vazio. Cada camião tem capacidade para transportar cerca de 30 toneladas de carga útil e apresenta uma tara de cerca de 6000kg. No transporte das pellets, devido à elevada densidade do material (500 kg/m^3), o camião consegue transportar a totalidade da carga útil (30t). O valor de energia gasto, é de $0,0008 \text{ GJ.(t.km)}^{-1}$ (Melman *et al.*, 1994). Considerámos a tara do camião no cálculo da energia associada ao transporte considerando um valor de tara proporcional à carga por ha. Ou seja, se por ha, a produção for de 20t, a tara do camião associada a estas 20t é de 4 t. Isto porque assumimos que o camião pode transportar a carga da unidade agrária de solo (1ha) e parte da produção de outro ha, até ao máximo de 30t. Atendendo à geografia do País, considerou-se uma distância média de 150 km entre a unidade produtora de pellets e a unidade doméstica de utilização das pellets.

Em relação aos dados da produtividade da biomassa, utilizaram-se os valores obtidos por Fernando (2005). Como as produtividades obtidas no 1º e 2º ano foram muito reduzidas, pois

nestes dois anos a planta gasta a sua energia para o estabelecimento do sistema, muito extenso, do rizoma e das raízes, estas colheitas não foram consideradas. A biomassa colhida permaneceu no solo. Consideraram-se apenas as produtividades e colheitas do 3º ano em diante. Considerou-se, também, apenas a biomassa em caules para a produção de energia (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Produtividade em caules de *Miscanthus* (Fonte: Fernando, 2005), em matéria seca (ms) e com 10% de humidade (mh), para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte

Data da colheita	Produtividade (t.ha ⁻¹) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	19,1 (ms)	16,1 (ms)	17,4 (ms)	14,5 (ms)
	21,2 (mh)	17,9 (mh)	19,4 (mh)	16,1 (mh)
Novembro	18,9 (ms)	15,9 (ms)	17,3 (ms)	14,4 (ms)
	21,0 (mh)	17,7 (mh)	19,3 (mh)	16,0 (mh)
Janeiro	17,5 (ms)	14,6 (ms)	16,5 (ms)	13,6 (ms)
	19,5 (mh)	16,3 (mh)	18,3 (mh)	15,1 (mh)

ms – matéria seca. mh – matéria húmida

Na **conversão energética** da biomassa consideraram-se os seguintes valores:

Poder calorífico do *Miscanthus* no 3º ano e seguintes = 17.2 GJ.t⁻¹ (matéria seca) (Fernando, 2005)

A utilização da caldeira de pellets assume um consumo elétrico de 280 W (em média), necessário para a ignição eléctrica e para o motor de extração de fumos (AGenergy, 2010). Considerando um consumo médio de 1,8 kg de pellets por hora (Vimasol, 2010), a energia necessária ao processo corresponde a 0,56 GJ.t⁻¹. O rendimento térmico garantido na caldeira de pellets é de 90% (Vimasol, 2010).

Balanco Energético GJ/ha ao longo de 15 anos, para se obter este valor é necessário efetuarem-se os seguintes cálculos:

$$\text{Balanco Energético GJ/ha ao longo de 15 anos} = (\text{produção energética} - \text{consumo energético})$$

Balanço Energético em GJ/ha por ano, consegue-se obter este valor, dividindo-se o valor obtido para o Balanço Energético GJ/ha ao longo de 15 anos, pelo número de anos (15).

$$\text{Balanço Energético em GJ/ha por ano} = \frac{\text{Balanço Energético GJ/ha ao longo de 15 anos}}{n^{\circ} \text{ de anos}}$$

Razão energética, este campo não tem unidades, visto tratar-se de uma razão, para se calcular esta razão é necessário dividir o valor obtido na produção energética pelo consumo global de energia (consumo energético associado à produção, transporte e conversão energética).

$$\text{Razão Energética} = \frac{\text{Produção energética}}{\text{Consumo energético}}$$

2.2 Impacte ambiental – emissões de azoto

Paralelamente, pretende-se também neste estudo avaliar a influência do manejo da cultura no impacte ambiental da produção de energia, nomeadamente nos aspetos relativos às emissões de azoto derivadas do cultivo, processamento e utilização dos *Miscanthus* para energia.

Neste estudo, as categorias estudadas foram as emissões de azoto para o solo, água e ar (tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Metodologias de avaliação das emissões de azoto (Fernando *et al.*, 2010c)

Indicador	Metodologia
Emissões derivadas da aplicação do fertilizante azotado	<ul style="list-style-type: none"> i. Quantificação do fertilizante azotado aplicado ii. Estimativa das emissões (IPCC, 2006): <ul style="list-style-type: none"> a. Volatilização de NH₃ (10%); b. Escoamento e lixiviação de NH₄/NO₃ (30%); c. Emissões de N₂O diretas (1%).
Emissões derivadas da combustão da biomassa	<ul style="list-style-type: none"> i. Quantificação da acumulação de azoto na biomassa ii. Estimativa das emissões (Biewinga e van der Bijl, 1996) <ul style="list-style-type: none"> a. 16% do teor de azoto da biomassa

3. Resultados e sua Discussão

3.1 Balanço energético da utilização de *Miscanthus* na produção de energia, por combustão, em Portugal

O principal objetivo deste capítulo será, portanto, a apresentação e avaliação do balanço energético da utilização de *Miscanthus* na produção de energia (calor), por combustão, em Portugal, tendo em atenção as diferentes datas de colheita e a altura a que é realizado o corte. A tabela 3.1 apresenta os resultados para os quatro cenários de altura do corte, para as diferentes datas de colheita (setembro, novembro e janeiro).

Tabela 3.1 – Cálculo do balanço energético na produção e conversão em energia dos *Miscanthus*, supondo uma duração do campo de 15 anos

Fases do processo	Fatores		Utilização (ha ⁻¹)	Energia (GJ.ha ⁻¹)			
				Cenário1	Cenário2	Cenário3	Cenário4
N-Fertilizantes	0,0386	GJ/kg ^(a)	60 kg, 15 anos	34,7	34,7	34,7	34,7
P-Fertilizantes	0,0076	GJ/kg ^(a)	100kg, 1º e 11º ano	1,52	1,52	1,52	1,52
K-Fertilizantes	0,003	GJ/kg ^(a)	140kg, 15 anos	6,30	6,30	6,30	6,30
Plântulas	6,6	GJ/ha ^(b)	1º ano	6,60	6,60	6,60	6,60
Trabalho Mecânico (excetuando a colheita)	0,096	GJ/ha ^(b)	1º ano, controlo de ervas	0,096	0,096	0,096	0,096
	0,348	GJ/ha ^(b)	15 anos	5,22	5,22	5,22	5,22
	0,154	GJ/ha ^(b)	15º ano, remoção rizomas	0,154	0,154	0,154	0,154
Rega	1,02	MJ/m ^{3(c)}	6800m ³ (1º e 2º ano) 3500 m ³ 3º anos e seguintes	60,3	60,3	60,3	60,3
Máquina de Colheita	2,7	GJ/ha ^(b)	15 anos	40,5	40,5	40,5	40,5
Colheita de Setembro							
Pelletização	0,018	GJ/t ^(b)	Do 3º ao 15º ano	4,46	3,76	4,08	3,38
Transporte	0,0008	GJ/(t.km) ^(a)	150 km, 13 anos	46,2	39,0	42,3	35,1
Conversão energética	0,56	GJ/t ^(d)	13 anos	154	130	141	117
Consumo energético				360	328	343	311
Produção energética^(e)				3834	3234	3508	2908
Balanço energético (em 15 anos)				3473	2906	3165	2597

Tabela 3.1 – Cálculo do balanço energético na produção e conversão em energia dos *Miscanthus*, supondo uma duração do campo de 15 anos (continuação)

Fases do processo	Fatores		Utilização (ha ⁻¹)	Energia (GJ.ha ⁻¹)			
				Cenário1	Cenário2	Cenário3	Cenário4
Balanço energético (por ano)				232	194	211	173
Razão energética (produção/consumo)				10,6	9,9	10,2	9,4
Colheita de Novembro							
Pelletização	0,018	GJ/t ^(b)	Do 3º ao 15º ano	4,42	3,72	4,06	3,36
Transporte	0,0008	GJ/(t.km) ^(a)	150 km, 13 anos	45,8	38,6	42,1	34,8
Conversão energética	0,56	GJ/t ^(d)	13 anos	153	129	140	116
Consumo energético				358	326	342	310
Produção energética ^(e)				3799	3200	3487	2888
Balanço energético (em 15 anos)				3441	2873	3146	2578
Balanço energético (por ano)				229	192	210	172
Razão energética (produção/consumo)				10,6	9,8	10,2	9,3
Colheita de Janeiro							
Pelletização	0,018	GJ/t ^(b)	Do 3º ao 15º ano	4,10	3,42	3,86	3,18
Transporte	0,0008	GJ/(t.km) ^(a)	150 km, 13 anos	42,5	35,5	40,1	33,0
Conversão energética	0,56	GJ/t ^(d)	13 anos	142	118	134	110
Consumo energético				344	313	333	302
Produção energética ^(e)				3526	2944	3322	2739
Balanço energético (em 15 anos)				3182	2632	2990	2437
Balanço energético (por ano)				212	175	199	162
Razão energética (produção/consumo)				10,3	9,4	10,0	9,1

(a) Melman *et al.* (1994); (b) Lewandowski *et al.* (1995); (c) Acaroglu e Aksoy (2005); (d) AGenenergy (2010) e Vimasol (2010); (e) Fernando (2005), Vimasol (2010)

Observando os resultados apresentados na tabela 3.1, pode verificar-se que a razão energética é sempre superior à unidade em todos os cenários estudados e também para todas as datas de colheita, e que o balanço energético é também positivo, quer para todos os cenários quer para todas as datas de colheita. Pode-se então, considerar a possibilidade de cultivar e utilizar os *Miscanthus* para produção de energia, em Portugal, considerando-se

mesmo que seria uma mais valia para o nosso país, uma vez que é um país de forte dependência energética externa.

O valor da razão energética estimado para os vários cenários e para as diferentes datas de colheita é ligeiramente inferior ao limite mínimo do intervalo de valores apontado por Venturi e Monti (2005) (12-66). Da mesma forma se verifica que os valores do balanço energético obtidos e apresentados na tabela 3.1 são inferiores ao intervalo apresentado por Venturi e Monti (2005) (242-523 GJ.ha⁻¹ por ano). A comparação dos valores da razão energética obtidos neste estudo (9,1-10,6) e os valores de balanço energético obtidos (162-232 GJ/ha/ano) são, no entanto, muito semelhantes aos resultados obtidos por Acaroglu e Aksoy (2005) na Turquia, no 3º ano de produção da cultura e utilizando 50 kg/ha de fertilizante azotado (10,61 e 224 GJ/ha/ano, respectivamente) e aos resultados da razão energética obtidos por Cipriano (2010), que utilizaram os mesmos dados de campo dos *Miscanthus* mas em que os pressupostos da sua utilização para energia foram diferentes dos aqui estudados (9,4). O balanço energético estimado por Cipriano (2010) é no entanto superior (321 GJ/ha por ano) ao intervalo de resultados obtido neste estudo.

Analisando os dados relativos à razão energética obtidos na colheita de setembro, pela figura 3.1, pode concluir-se que o cenário 1 é o que apresenta um valor mais elevado, ou seja a razão entre a produção e o consumo é maior. Sendo que para o cenário 4, este valor é o mais baixo.

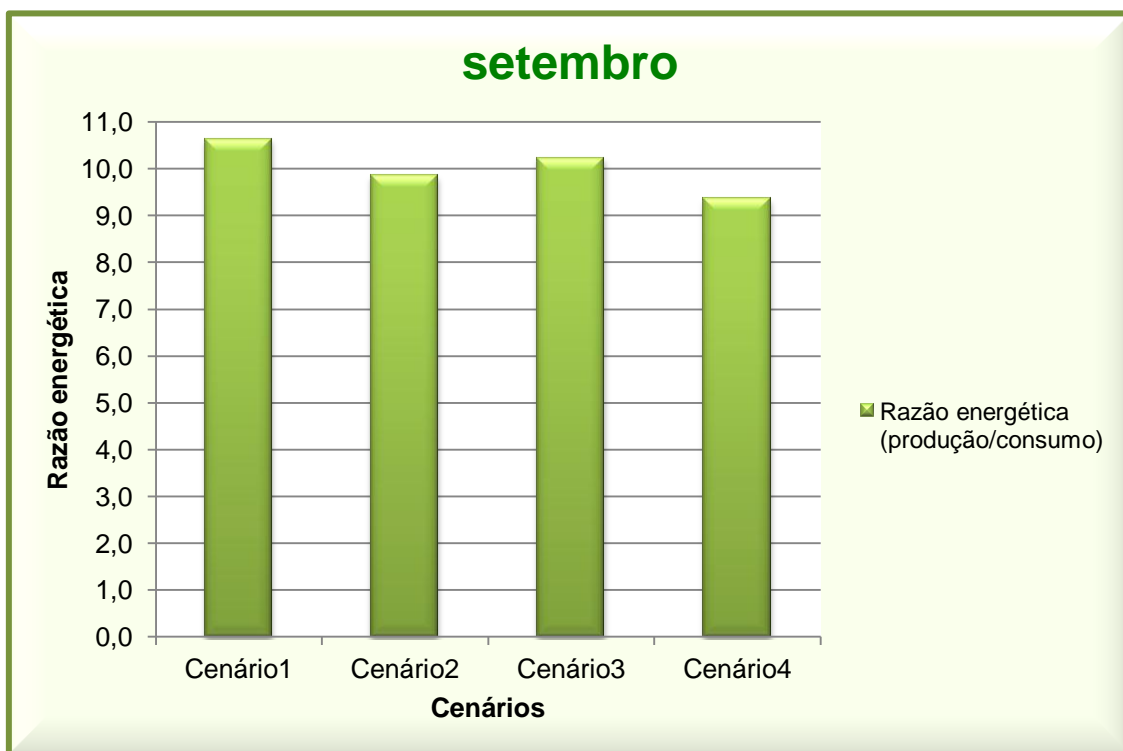


Figura 3.1- Razão energética do cultivo de *Miscanthus*, no mês de setembro.

Esta diferença deve-se principalmente às diferentes produções energéticas que são tanto mais elevadas quanto maior é a biomassa que se consegue obter por hectare, o que logicamente é

superior no caso do cenário 1 pois é neste cenário que uma maior quantidade de biomassa é colhida. Embora se tenha verificado, também, que a maior quantidade de biomassa colhida no cenário 1 também incrementa o consumo energético, devido aos maiores gastos realizados na pelletização, no transporte e na conversão térmica, que são dependentes da quantidade de biomassa. No entanto, este incremento no consumo, que é devido à maior produção de biomassa, apresenta menos significado do que o incremento na produção, motivado também pela maior produção de biomassa. A análise da figura 3.1 também indica que a diferença na razão energética obtida entre cenários não é significativa, embora se verifique que é tendencialmente decrescente do Cenário 1 para o Cenário 3, seguindo-se o Cenário 2 e por fim o Cenário 4.

O mesmo perfil entre cenários se observa na colheita de Setembro, para o cálculo do balanço energético (figura 3.2). O cenário 1 é o mais vantajoso, seguindo-se o cenário 3, o cenário 2 e por fim, com o menor valor associado, o cenário 4. Esta diferença de resultados entre cenários, para a mesma data de colheita, deve-se principalmente às diferenças na quantidade de biomassa processada, tal como discutido na razão energética.

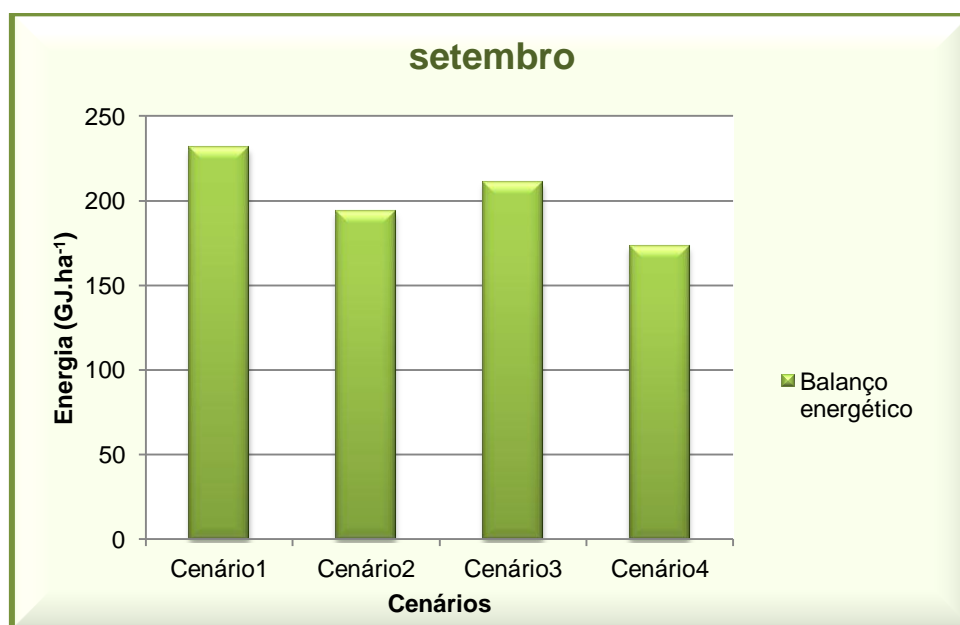


Figura 3.2 – Balanço energético, para os diferentes cenários, para a colheita de setembro.

Analisando os dados relativos à razão energética obtidos entre colheitas, para os dados do Cenário 1, pela figura 3.3, pode concluir-se que não se observam diferenças entre a colheita de setembro e a colheita de novembro, verificando-se uma diminuição da razão na colheita de janeiro, mas com pouco significado. As mesmas conclusões podem ser retiradas da análise da figura 3.4, referente aos dados do balanço energético obtido para o Cenário 1, nas diferentes datas de colheita. As diferenças observadas entre as datas de colheita surgem também por motivo da quantidade de biomassa que é processada para combustão, que é superior na

colheita de setembro, diminuindo (com pouco significado), para as colheitas de novembro e janeiro.

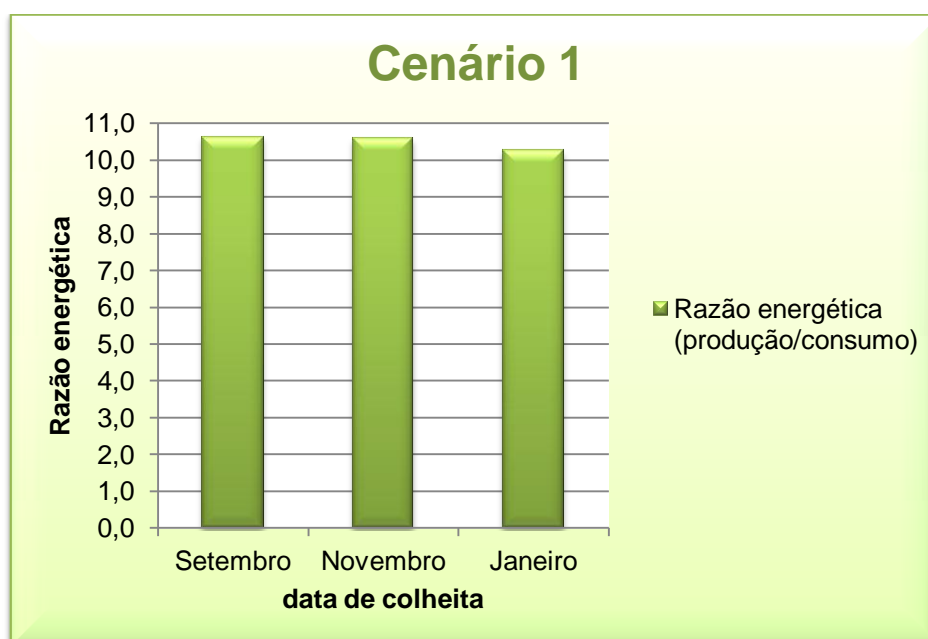


Figura 3.3 – Razão energética, para as diferentes datas de colheita, para o Cenário 1 (aproveitamento do caule da base até ao topo).



Figura 3.4 – Balanço energético, para as diferentes datas de colheita, para o Cenário 1 (aproveitamento do caule da base até ao topo).

A figura 3.5 apresenta a razão energética obtida para os diferentes cenários e nas diferentes datas de colheita. Como se pode observar, entre setembro e novembro não há diferenças significativas, verificando-se uma diminuição na razão energética obtida em janeiro (redução

com pouco significado). Entre cenários, o cenário 1 é o mais vantajoso, seguindo-se o cenário 3, o cenário 2 e o cenário 4 é o menos vantajoso.

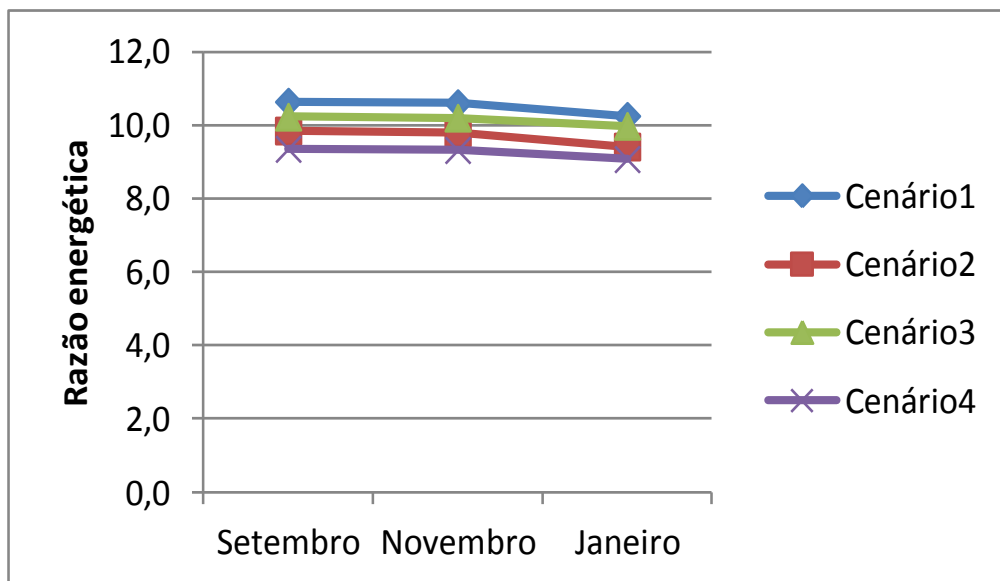


Figura 3.5 – Razão energética, para as diferentes datas de colheita, e para os diferentes cenários de altura do corte.

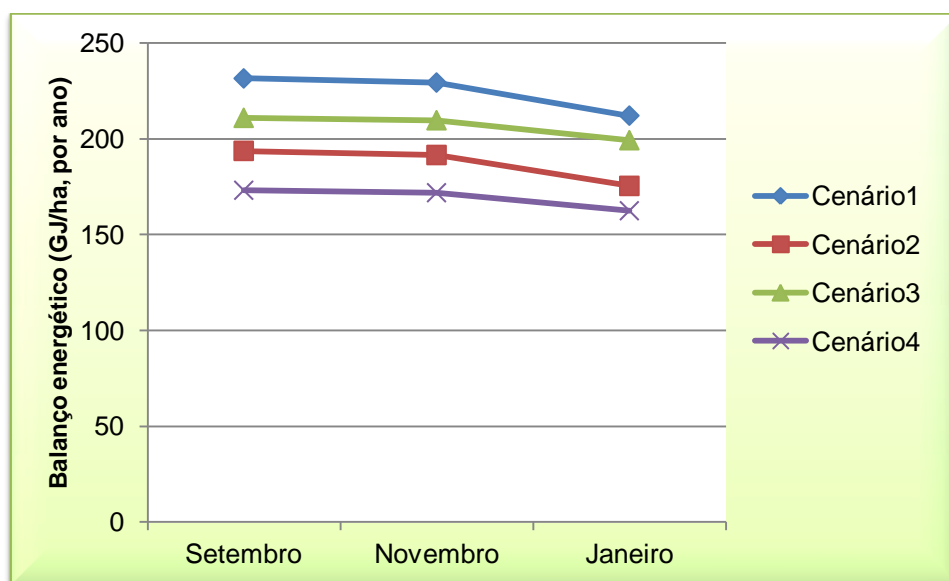


Figura 3.6 – Balanço energético, para as diferentes datas de colheita, e para os diferentes cenários de altura do corte.

A figura 3.6 apresenta esquematicamente os mesmos resultados, neste caso em relação ao balanço energético por ano. Verifica-se que as diferenças entre datas de colheita são pouco significativas, embora se observe uma redução na colheita de janeiro, mas entre cenários os

resultados obtidos já apresentam maior significado. O cenário 1 continua a ser o mais vantajoso e o cenário 4, o menos vantajoso.

Analisando os gráficos das figuras 3.7 e 3.8, pode-se verificar que os fatores que mais contribuem para o consumo energético são a energia necessária à conversão energética e a rega. Seguem-se os fatores relacionados com a energia necessária para a produção do fertilizante azotado, para a colheita e para o transporte.

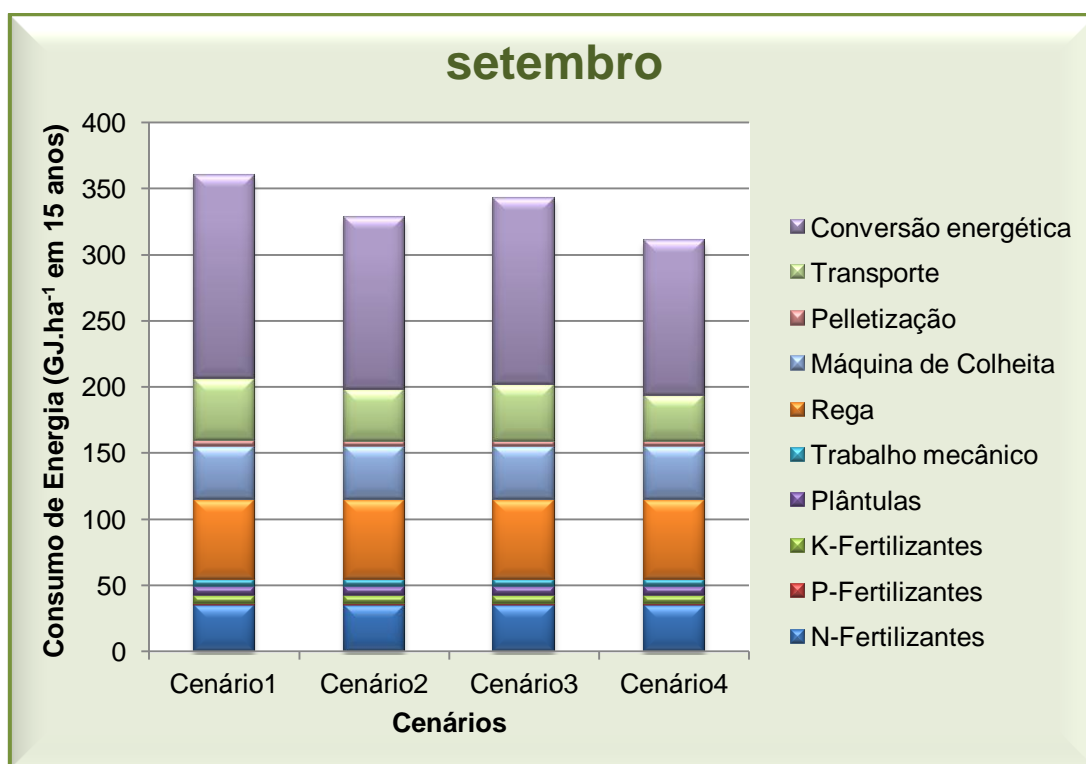


Figura 3.7 – Energia necessária para a produção, transporte e conversão de *Miscanthus*, para os diferentes cenários apresentados, para a colheita de setembro, ao longo de 15 anos.

A figura 3.8 indica que 43% do consumo energético é relativo à energia necessária à conversão energética (cenário 1, colheita de setembro). O transporte (13%) e a pelletização (1%) representam 14% do consumo energético e a fase agronómica do cultivo e colheita dos *Miscanthus* representam os restantes 43% do consumo energético. Na fase agronómica, a rega (17%), a colheita (11%) e a produção do fertilizante azotado (10%), representam os fatores que mais contribuem para o consumo energético.

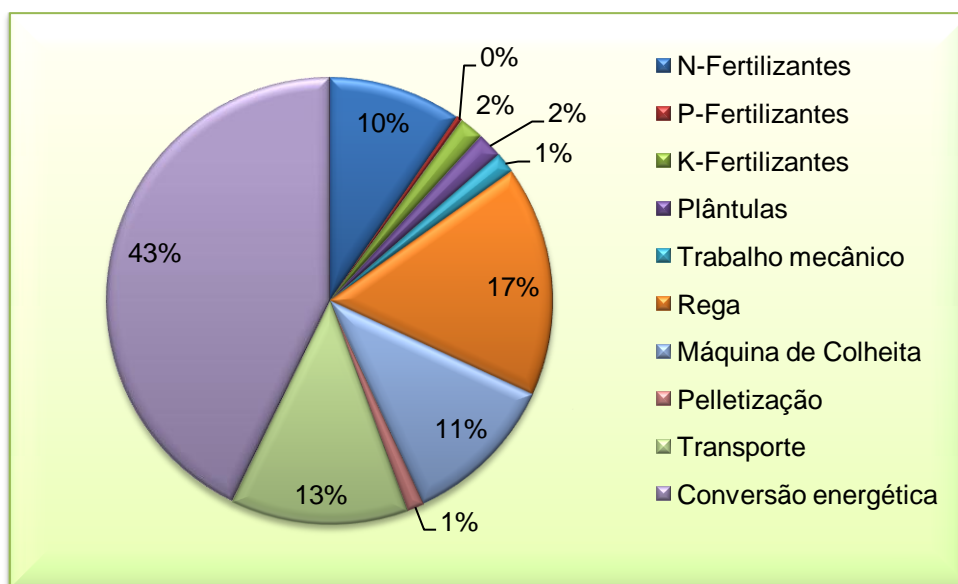


Figura 3.8 – Distribuição do consumo energético (%) necessário para a produção, transporte e conversão de *Miscanthus*, para o Cenário 1, na colheita de setembro, ao longo de 15 anos.

3.2 Impacte ambiental – emissões de azoto

Em termos da utilização das culturas energéticas para produção de energia, os aspectos ambientais da sua produção, assim como os aspectos económicos e sociais, devem também ser tidos em conta no processo de decisão. Em relação a este estudo, o cálculo do balanço energético e da razão energética aponta que os melhores resultados são obtidos nas colheitas de setembro e novembro, e quando são aproveitados os caules desde a base até ao topo da planta. Mas, em relação à utilização da planta para a produção de energia por combustão, é também importante analisar a qualidade da biomassa que é processada sob a forma de pellets, assim como outros aspectos relacionados com o manejo da cultura. Nomeadamente, neste estudo, pretende-se também avaliar a influência do manejo da cultura (datas de colheita e alturas de corte), nos aspectos relativos às emissões de azoto, quer as derivadas da utilização dos *Miscanthus* para energia, quer as derivadas da aplicação dos fertilizantes azotados.

A aplicação de fertilizantes azotados no solo pode contribuir para diversos problemas, o que inclui a contribuição para a acidificação, devido à volatilização do amoníaco e dos óxidos de azoto, a contribuição para o efeito de estufa e para a depleção de ozono, devido à desnitrificação a óxido nitroso e a contribuição para a eutrofização, devido à lixiviação e escoamento do azoto amoniacal e de nitratos (Fernando *et al.*, 2010b).

De acordo com o IPCC (2006), estima-se que 10% da aplicação de fertilizante azotado pode ser volatilizado e 30% pode ser perdido por lixiviação e escoamento. As emissões de N_2O

podem ocorrer de forma direta (1% da quantidade de azoto aplicada), e via indireta: (i) como resultado da volatilização do NH_3 e de NO_x dos solos manejados (1%) e (ii) como resultado do azoto lixiviado e escoado, sobretudo dos nitratos, dos solos manejados (0,75%) (IPCC, 2006). A tabela 3.2 apresenta as emissões que podem surgir da aplicação do fertilizante azotado, tendo em atenção que foram aplicados 60 kg/ha de azoto (N).

Tabela 3.2 – Emissões derivadas da aplicação do fertilizante azotado (IPCC, 2006)

Indicador	Emissões de azoto (kg/ha, N)
Volatilização de NH_3 e de NO_x	6
Escoamento e lixiviação de NH_4/NO_3	18
Emissões de N_2O diretas	0,6
Total	24,6

Os resultados apresentados na tabela 3.2 indicam que uma fatia importante do azoto aplicado é emitido para as águas e ar (utilizando os factores do IPCC), com impactes ambientais e também económicos (uma vez que parte do fertilizante azotado custeado é “perdido”). De acordo com este resultado, apenas 35,4 kg/ha de N (azoto aplicado, 60 kg/ha – azoto emitido, 24,6 kg/ha) ficam disponíveis para serem acumulados pelas plantas ou para repor as reservas do solo.

Na utilização dos *Miscanthus* para energia, por combustão, a formação de NO_x , que pode ocorrer devido às temperaturas elevadas da combustão, pode ser uma desvantagem (Lewandowski *et al.*, 1995), uma vez que estes compostos têm poder acidificante. As emissões de azoto derivadas da combustão da biomassa podem ser estimadas pela quantidade de azoto acumulada na biomassa (tabela 3.3). De acordo com Biewinga e van der Bijl (1996), durante a combustão, o azoto da biomassa sólida é parcialmente convertido a NO_x dependendo do teor de azoto da biomassa. Quando a biomassa apresenta teores em azoto reduzidos, da ordem dos 0,1%, estima-se que cerca de 80% desse azoto possa formar NO_x . No entanto, estima-se que só parte dos NO_x formados serão efectivamente emitidos (cerca de 20%), se os sistemas de combustão forem equipados com filtros ou outros que podem controlar e diminuir as emissões (Biewinga e van der Bijl. 1996). Na combustão de biomassa pode haver também emissões de NO_x derivadas da formação destes óxidos pela oxidação a elevadas temperaturas do azoto molecular presente na atmosfera da combustão. Estas emissões de azoto não serão aqui contabilizadas.

Tabela 3.3 – Quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus* (Fonte: Fernando, 2005), e emissões de azoto derivadas da combustão, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte

Data da colheita	Azoto acumulado na biomassa (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	39,3	35,4	30,4	26,4
Novembro	11,5	10,2	9,71	8,37
Janeiro	15,6	14,0	13,2	11,6
	Emissões derivadas da combustão da biomassa (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	6,29	5,66	4,86	4,22
Novembro	1,84	1,63	1,55	1,34
Janeiro	2,50	2,24	2,11	1,86

De acordo com os resultados apresentados na tabela 3.3, verifica-se que podem ocorrer mais emissões derivadas da combustão de *Miscanthus* na colheita efectuada em Setembro. Com efeito, na colheita de Setembro, a quantidade de azoto acumulada na biomassa é significativamente superior à observada nas colheitas de novembro e janeiro. Nesta data, a cultura ainda não translocou todo o azoto da biomassa aérea para a biomassa radicular.

A colheita mais tardia, em novembro e janeiro, melhora a qualidade da combustão pois a biomassa apresenta um menor teor de humidade e em componentes indesejáveis, como o cloreto, o potássio e cinza, que entretanto foram lixiviados da biomassa (Lewandowski e Heinz, 2003) e de azoto, fósforo e outros nutrientes, que entretanto com a lenhificação da biomassa desmobilizaram da biomassa aérea para a biomassa rizomatosa (Fernando, 2005). A redução dos teores de cloretos, água e azoto na biomassa com a colheita tardia conduz à redução das emissões de substâncias ambientalmente prejudiciais (como os óxidos de azoto) durante a combustão e reduz a energia necessária à secagem (Lewandowski e Heinz, 2003).

A comparação entre cenários, ou seja, entre diferentes alturas de corte da biomassa, revela que é no cenário 1 que podem ocorrer mais emissões derivadas da combustão de *Miscanthus*, pois é neste cenário que se verifica maior acumulação de azoto na biomassa. Os teores de azoto acumulados diminuem na série cenário 1 > cenário 2 > cenário 3 > cenário 4. O cenário 3, apesar de apresentar maior quantidade de biomassa a processar do que o cenário 2 (tabela 2.1), apresenta menor acumulação de azoto, porque aos teores de azoto tendem a aumentar

da base para o topo do caule (Fernando, 2005). Isto significa que no cenário 3, apesar de se conseguir colher mais biomassa do que no cenário 2, como da base até aos 200cm os teores de azoto são reduzidos, a acumulação de azoto será inferior do que à observada no cenário 2, em que a biomassa colhida dos 25cm ao topo é inferior mas que apresenta teores de azoto superiores (sobretudo nas fracções do topo), sendo a acumulação em azoto superior também.

Os resultados apresentados na tabela 3.3 indicam também que as diferenças entre cenários (em termos de altura do corte) não são tão significativas como as observadas entre a data de colheita de setembro e as datas de colheita de novembro e janeiro.

Portanto, se consideramos que as emissões derivadas da combustão da biomassa podem ser estimadas pela quantidade de azoto acumulada na biomassa, verificamos que o cenário 4 é o mais vantajoso, assim como as colheitas de novembro e janeiro, pois apresentam menores teores de azoto acumulado na biomassa.

No entanto, a colheita tardia ou a colheita de biomassa dos 25 cm aos 200cm, conduz à perda de biomassa processada, o que vai influenciar o balanço energético, tal como estudado no ponto anterior (3.1). Portanto, quer na escolha da data apropriada para a colheita, quer na escolha do cenário de corte dos caules, é necessário otimizar o conflito entre a produtividade e a qualidade da biomassa.

A tabela 3.4 apresenta a totalidade das emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado e da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus*.

Tabela 3.4 – Emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado e da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus*, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte

Data da colheita	Emissões de azoto (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	30,9	30,3	29,5	28,8
Novembro	26,4	26,2	26,2	25,9
Janeiro	27,1	26,8	26,7	26,5

Neste estudo, foi decidido não contabilizar as emissões de azoto decorrentes da utilização de recursos fósseis durante o cultivo, o processamento, o transporte e a conversão em energia dos *Miscanthus*. Não foram também contabilizadas as emissões de azoto que poderiam ser evitadas pela substituição de combustíveis fósseis por *Miscanthus* na produção de energia. Em relação à fase agronómica (produção de fertilizantes e plântulas, trabalho mecânico incluindo a

colheita e rega), os consumos de energia são iguais em todos os cenários e datas estudadas. Em relação aos factores que consomem energia (e que podem contribuir com emissões de NOx) e que são dependentes da quantidade de biomassa processada (pelletização, transporte e conversão energética), e portanto variáveis com a data de colheita e com o tipo de corte, assumimos que a sua emissão seria “evitada” de forma proporcional pela produção de energia a partir de *Miscanthus* (pela substituição de combustíveis fósseis que também emitem NOx), também variável com a data de colheita e com o tipo de corte. Ou seja, por exemplo, no Cenário 1, colheita de Setembro, em que há maior quantidade de biomassa a processar (tabela 2.1), considerámos que o aumento das emissões de azoto decorrentes da necessidade de maior consumo energético para a pelletização, transporte e conversão seriam contrabalançadas pelo aumento das emissões evitadas decorrentes de uma maior quantidade de energia produzida. No estudo, não contabilizámos também as emissões de azoto que podem derivar dos compostos de azoto presentes na água de rede (como os nitratos).

Portanto, de forma a equacionar o balanço energético e as emissões de azoto, de forma a optar pela data de colheita e pelo cenário de corte que apresente a solução mais sustentável (do ponto de vista dos indicadores que aqui estamos a estudar), foi efetuada a normalização dos resultados, para facilitar a comparação e a hierarquização dos resultados obtidos, de acordo com a metodologia indicada em Fernando *et al.* (2010c). Nesta normalização, foi definida uma escala normalizada de magnitudes para cada indicador utilizado. Para cada indicador, foi assumida uma escala linear de zero a dez, representando o “dez” uma situação completamente negativa e o “zero” a situação contrária. O valor cinco corresponde à situação de referência que, em Portugal, será a pastagem de sequeiro ou o pousio. No caso do balanço energético, o valor 0 GJ/ha/ano, corresponde ao valor 5. Na situação de referência não haverá produção de energia mas também não haverá consumo. No caso das emissões de azoto, o valor 0 kg/ha N, corresponde ao valor 5. Na situação de referência não haverá aplicação de fertilizante azotado e não haverá combustão de biomassa, e portanto as emissões de azoto decorrentes destes processos não terão lugar. Para cada indicador, o “0” ou o “10”, são determinados pelo resultado mais extremo obtido para as diferentes datas de colheita e para os diferentes cenários de corte da planta. A figura 3.9 mostra os resultados normalizados para o balanço energético e para as emissões de azoto. De acordo com os resultados apresentados na figura 3.9, a normalização dos resultados do balanço energético indica que este indicador é positivo por apresentar valores muito próximos de “0”, uma vez que a utilização de *Miscanthus* para energia permitirá substituir, e por conseguinte, poupar, combustíveis fósseis. Por sua vez, a normalização dos resultados das emissões de azoto mostra que os mesmos são negativos, por apresentarem resultados muito próximos de “10”, sobretudo devido às emissões derivadas da aplicação do fertilizante azotado. Mas entre datas de colheita e entre cenários de altura de corte da biomassa não se verificam diferenças acentuadas.

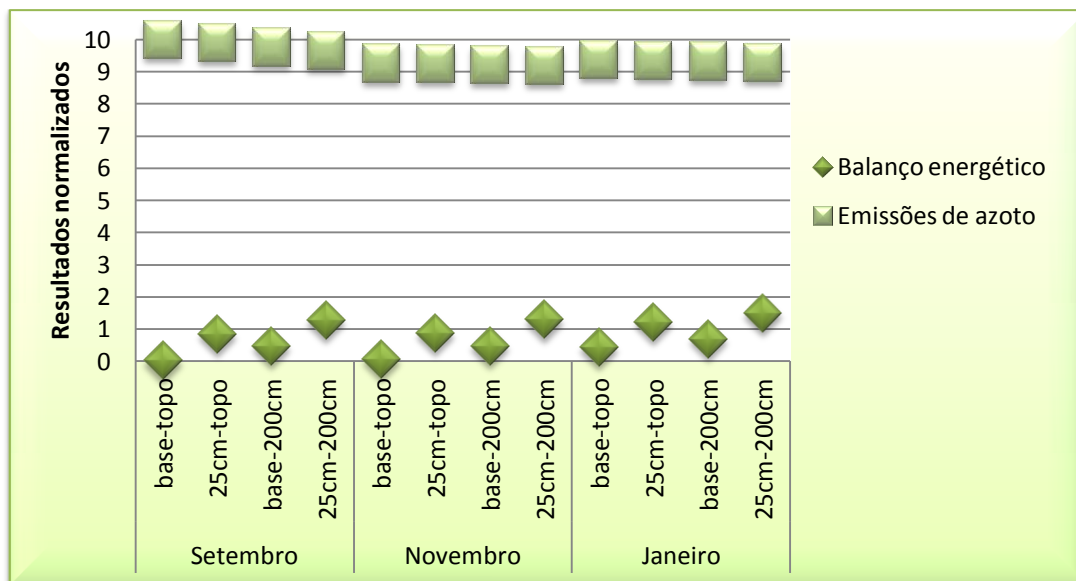


Figura 3.9 – Resultados normalizados para o balanço energético e para as emissões de azoto, nas diferentes datas de colheita e nos diferentes cenários de corte da biomassa

O estabelecimento de uma função de agregação entre os diversos indicadores estudados (neste caso, dois, o balanço energético e as emissões de azoto) permitirá representar o resultado da avaliação segundo um valor numérico, obtido a partir dos valores normalizados dos indicadores estudados. Portanto, cada indicador é afectado de um peso, cujo objectivo é o da representação da importância relativa do indicador para a apreciação global. O resultado final normalizado da avaliação, é calculado a partir da média aritmética ponderada dos resultados normalizados dos n indicadores considerados na avaliação (Fernando, 2005).

A construção e implementação de uma metodologia deste tipo, apresenta vantagens e desvantagens, semelhantes às que são encontradas quando se pretende construir e utilizar um sistema de indicadores para um determinado fim. Sendo o objectivo principal a possibilidade de uma comparação rápida entre um conjunto de opções ou situações diversas, nem sempre é possível incluir no sistema toda a informação relativa às entidades comparadas. (Fernando, 2005)

Alguns autores referem que a ponderação deve refletir a importância dos indicadores no contexto do estudo (Schmidt e Sullivan, 2002), mas esta definição confere ambiguidade e subjetividade ao estudo. De modo a avaliar a influência do sistema de ponderação nos resultados finais agregados, três diferentes classificações foram aplicadas:

SP1 – todos os indicadores têm o mesmo peso (balanço energético e emissões de azoto -0,5);

SP2 – o indicador balanço energético com maior peso (balanço energético – 0,75; emissões de azoto – 0,25);

SP3 – o indicador emissões de azoto com maior peso (balanço energético – 0,25; emissões de azoto – 0,75).

O maior peso atribuído ao balanço energético (SP2) traduz a importância que se confere à possibilidade de substituição de combustíveis fósseis na produção de energia e, por consequência, às emissões de CO₂ que podem ser evitadas na utilização desta fonte de energia renovável (tal como indicado no trabalho de Fernando, 2005). O maior peso atribuído às emissões de azoto (SP3) traduz a importância que se confere à possibilidade de evitar emissões que contribuem para a acidificação. No entanto, estes factores de ponderação estudados têm de ser considerados como uma tentativa de agregação uma vez que foi considerada uma abordagem simplificada. A figura 3.10 mostra os resultados finais agregados, tendo em conta as diferentes classificações aplicadas, para as diferentes datas de colheita e para os diferentes cenários de altura do corte.

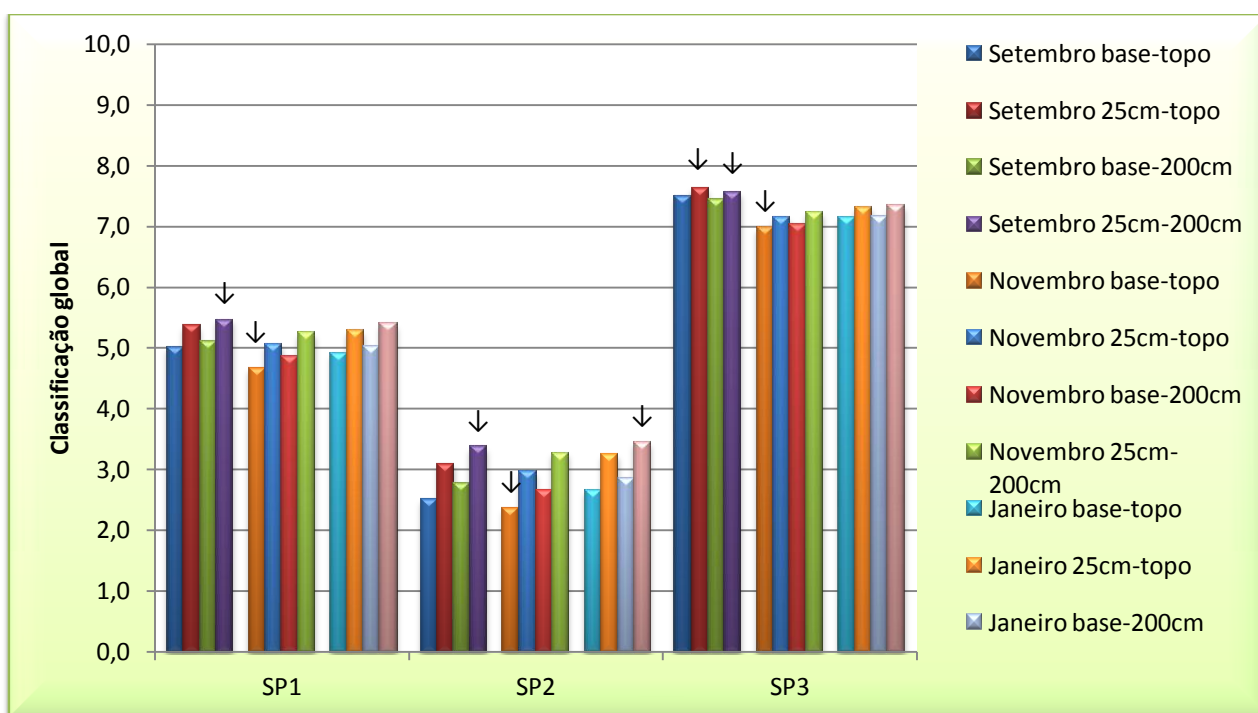


Figura 3.10 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa (SP1 - os indicadores têm o mesmo peso; SP2 - balanço energético com maior peso; SP3 - emissões de azoto com maior peso); as setas a preto indicam em cada sistema de ponderação a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos); as setas a vermelho indicam em cada sistema de ponderação as opções que apresentam os resultados mais elevados (e mais negativos)

De acordo com os resultados da figura 3.10 verifica-se que nos três diferentes sistemas de ponderação a opção que se apresenta como mais sustentável (tendo em atenção os dois indicadores utilizados) é a colheita de novembro e na qual todo o caule (da base ao topo) é

processado. Em novembro, a quantidade de biomassa colhida é inferior à quantidade que pode ser processada com a colheita de setembro, mas esta redução não é significativa. Em contrapartida, a acumulação de azoto na biomassa em novembro é significativamente mais reduzida do que em setembro, contribuindo assim para a obtenção de valores agregados mais reduzidos. As opções que resultaram em valores mais negativos (mais elevados) foram a colheita em setembro, com utilização da fração de caules dos 25 aos 200 cm (em todos os sistemas de ponderação); colheita em janeiro e utilização da fração de caules dos 25 aos 200 cm, em SP2; colheita em setembro e utilização da fração de caules dos 25cm ao topo, em SP3. Estes resultados devem, no entanto, ser encarados com alguma reserva para fins de decisão ou planeamento, servindo no entanto, para apontar tendências em relação aos dois indicadores estudados e à agregação desses resultados. Em relação aos sistemas de ponderação estudados, verifica-se que em SP1, em que ambos indicadores têm o mesmo peso, se verifica que os resultados são neutros, próximos do valor 5. Neste sistema, os aspetos positivos da substituição de combustíveis fósseis por *Miscanthus* na produção de energia é contrabalançada pelos aspetos negativos associados às emissões de azoto. Em SP2, em que se confere mais peso ao indicador balanço energético, um fator positivo, verifica-se que os resultados apresentam valores mais positivos, entre 2-3. Em SP2, em que se confere mais peso ao indicador emissões de azoto, um fator negativo, verifica-se que os resultados apresentam valores mais negativos, cerca de 7.

3.3 Análise de sensibilidade

Em relação às diferentes datas de colheita e nos diversos cenários de corte em altura, pretendemos alterar algumas das variáveis e verificar os resultados obtidos.

3.3.1 Contabilização das emissões de azoto associadas à utilização e poupança de combustíveis fósseis

A tabela 3.5 apresenta os resultados das emissões associadas à utilização e poupança de combustíveis fósseis, para os quatro cenários de altura do corte, para as diferentes datas de colheita. Para tal foram contabilizadas as emissões de azoto decorrentes da utilização de recursos fósseis durante o cultivo, o processamento, o transporte e a conversão em energia dos *Miscanthus*. Foram também contabilizadas as emissões de azoto que poderiam ser evitadas pela substituição de combustíveis fósseis por *Miscanthus* na produção de energia. As emissões de NOx foram contabilizadas a partir do balanço energético, afectando fatores de emissão à produção e ao consumo de energia, por processos de combustão tal como descrito em Biewinga e van der Bijl (1996) e Fernando (2005). Estes factores de emissão estão associados ao tipo de combustível utilizado ou poupado. No caso da produção de fertilizantes e plântulas, na pelletização e na conversão energética foi utilizado o fator de 55 g(N)/GJ; no

trabalho mecânico e na colheita foi utilizado o fator de 377 g(N)/GJ; na rega, utilizando bombas a electricidade, foi utilizado o fator de 51 g(N)/GJ; no transporte (camião a gasóleo) foi utilizado o fator de 294 g(N)/GJ; e na produção energética utilizámos o fator associado às emissões de NO_x da combustão de gás, 33 g(N)/GJ (Fernando, 2005, NO_x expresso em NO₂ na conversão dos factores de gNO_x a gN).

Tabela 3.5 – Emissões de azoto associadas à utilização e poupança de combustíveis fósseis na utilização de *Miscanthus* para energia, e balanço de emissões evitadas, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte

Data da colheita	Emissões de azoto (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte, derivadas do consumo de combustíveis fósseis (A)			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	3,04	2,80	2,91	2,68
Novembro	3,02	2,79	2,90	2,67
Janeiro	2,92	2,69	2,84	2,61
Data da colheita	Emissões de azoto evitadas (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte, derivadas da substituição de combustíveis fósseis por <i>Miscanthus</i> (B)			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	8,56	7,22	7,83	6,49
Novembro	8,48	7,14	7,78	6,45
Janeiro	7,87	6,57	7,42	6,11
Data da colheita	Balanço de Emissões de azoto evitadas (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte (B-A)			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	5,52	4,42	4,92	3,81
Novembro	5,46	4,35	4,88	3,78
Janeiro	4,95	3,88	4,58	3,50

A tabela 3.6 apresenta a totalidade das emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado e da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus* (tabela 3.4) subtraídas das emissões evitadas contabilizadas na tabela 3.5

Tabela 3.6 – Emissões de azoto estimadas incluindo a utilização e poupança de combustíveis fósseis na utilização de *Miscanthus* para energia, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (com as emissões associadas à combustão de combustíveis fósseis)

Data da colheita	Emissões de azoto (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	25,4	25,8	24,5	25,0
Novembro	21,0	21,9	21,3	22,2
Janeiro	22,1	23,0	22,1	23,0

A figura 3.11 mostra os resultados finais agregados de acordo com o sistema de ponderação SP1, para as diferentes datas de colheita e para os diferentes cenários de altura do corte, com e sem a contabilização das emissões de azoto associadas à utilização e poupança de combustíveis fósseis.

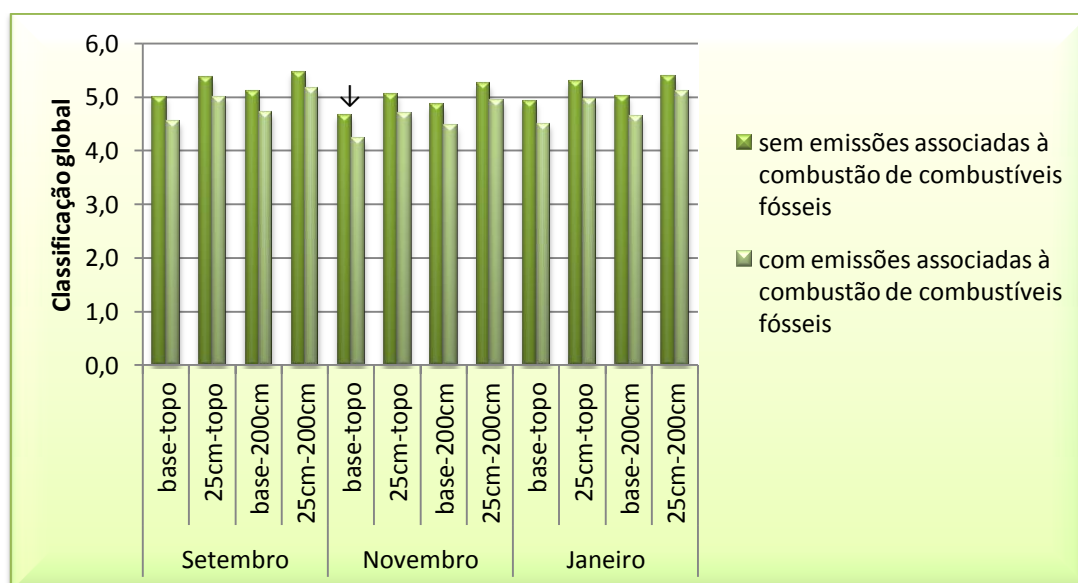


Figura 3.11 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, com e sem as emissões associadas à combustão de combustíveis fósseis; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos)

Perante os resultados apresentados, verifica-se que a inclusão das emissões associadas à combustão e poupança de combustíveis fósseis, resulta em todos os cenários e datas de

colheita na diminuição dos valores da classificação agregada (um resultado positivo). Com efeito, nesta contabilização as emissões evitadas são superiores às emissões geradas, com a despenalização do indicador que contribui negativamente para a classificação global (emissões de azoto). A opção mais vantajosa continua a ser a colheita de novembro e na qual todo o caule (da base ao topo) é processado.

3.3.2 Redução das emissões de azoto associadas à aplicação do fertilizante azotado

A tabela 3.2 apresentou as emissões que podem surgir da aplicação do fertilizante azotado, tendo em atenção que foram aplicados 60 kg/ha de azoto (N). Estas emissões foram calculadas com base no IPCC (2006). Considerando que a matriz rizomatosa dos *Miscanthus* pode efectivamente sequestrar o azoto amoniacal e os nitratos que se podem escoar e lixiviar da aplicação do fertilizante azotado (Fernando, 2005), considerámos que, neste caso, as emissões seriam correspondentes a 15%, e não 30%, como indicado pelo IPCC (2006). As emissões correspondentes à volatilização e as emissões diretas de N₂O manter-se-iam (tabela 3.7)

Tabela 3.7 – Emissões derivadas da aplicação do fertilizante azotado, considerando 15% nas emissões por escoamento e lixiviação

Indicador	Emissões de azoto (kg/ha, N)
Volatilização de NH ₃ e de NO _x	6
Escoamento e lixiviação de NH ₄ /NO ₃	9
Emissões de N ₂ O diretas	0,6
Total	15,6

A tabela 3.8 apresenta a totalidade das emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado (utilizando os dados da tabela 3.7) e da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus* (utilizando os dados da tabela 3.3)

Tabela 3.8 – Emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado e da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus*, para as diferentes datas de colheita

e diferentes alturas de corte (com redução das emissões de azoto escoadas e lixiviadas do fertilizante azotado)

Data da colheita	Emissões de azoto (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	21,9	21,3	20,5	19,8
Novembro	17,4	17,2	17,2	16,9
Janeiro	18,1	17,8	17,7	17,5

A figura 3.12 mostra os resultados finais agregados de acordo com o sistema de ponderação SP1, para as diferentes datas de colheita e para os diferentes cenários de altura do corte, contabilizando o escoamento e lixiviação do fertilizante azotado aplicado em 30% e 15%.

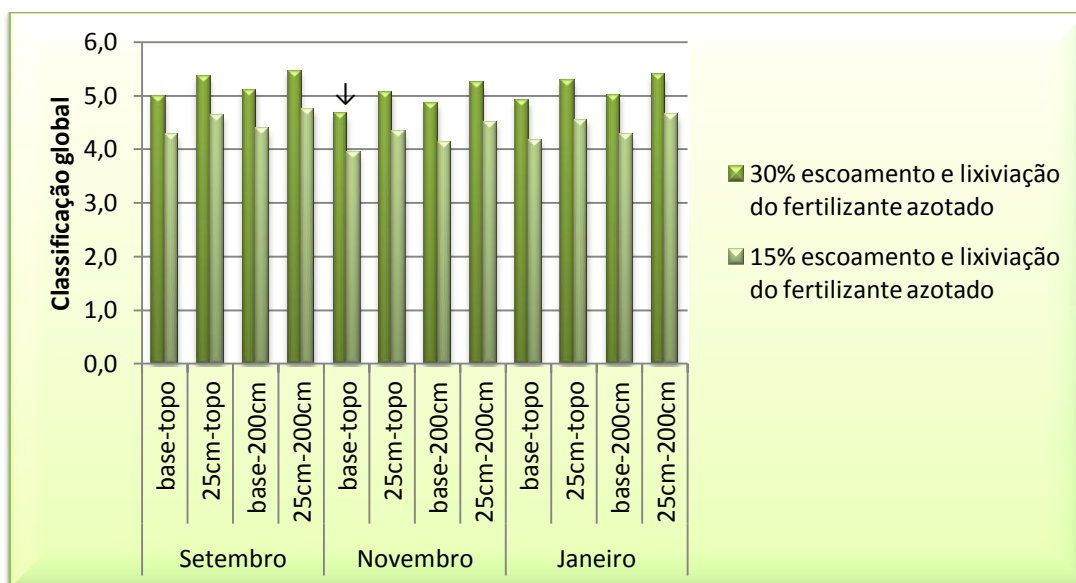


Figura 3.12 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, e para diferentes taxas de escoamento e lixiviação do fertilizante azotado aplicado; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos)

Perante os resultados apresentados, verifica-se que a diminuição das emissões associadas ao escoamento e lixiviação do fertilizante azotado, resulta em todos os cenários e datas de colheita na diminuição significativa dos valores da classificação agregada (um resultado positivo). A opção mais vantajosa continua a ser a colheita de novembro e na qual todo o caule (da base ao topo) é processado.

3.3.3 Redução das emissões de azoto associadas à combustão da biomassa

A tabela 3.3 apresentou as emissões de azoto derivadas da combustão da biomassa. No cálculo, foi indicado que 80% do azoto acumulado pode formar NOx no processo de combustão e que só parte dos NOx formados serão efectivamente emitidos (cerca de 20%), se os sistemas de combustão forem equipados com filtros ou outros que podem controlar e diminuir as emissões (Biewinga e van der Bijl. 1996). Considerando que o processo tecnológico de combustão pode ser melhorado em termos emissões de NOx formadas, considerámos que apenas 10% dos NOx formados seriam emitidos (tabela 3.9). A tabela 3.9 apresenta também o recálculo da totalidade das emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado (utilizando os novos dados da emissão de NOx na combustão da biomassa) e da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus* (utilizando os dados da tabela 3.3).

Tabela 3.9 – Emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus*, e totalidade das emissões de azoto, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (com redução da taxa de emissão dos NOx)

Data da colheita	Emissões derivadas da combustão da biomassa (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	3,14	2,83	2,43	2,11
Novembro	0,92	0,82	0,78	0,67
Janeiro	1,25	1,12	1,06	0,93
Data da colheita	Emissões de azoto (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	27,7	27,4	27,0	26,7
Novembro	25,5	25,4	25,4	25,3
Janeiro	25,8	25,7	25,7	25,5

A figura 3.13 mostra os resultados finais agregados de acordo com o sistema de ponderação SP1, para as diferentes datas de colheita e para os diferentes cenários de altura do corte, contabilizando a emissão de NOx derivada da combustão da biomassa em 20% dos NOx

formados e 10% dos NOx formados (que correspondem a 80% do azoto acumulado na biomassa).

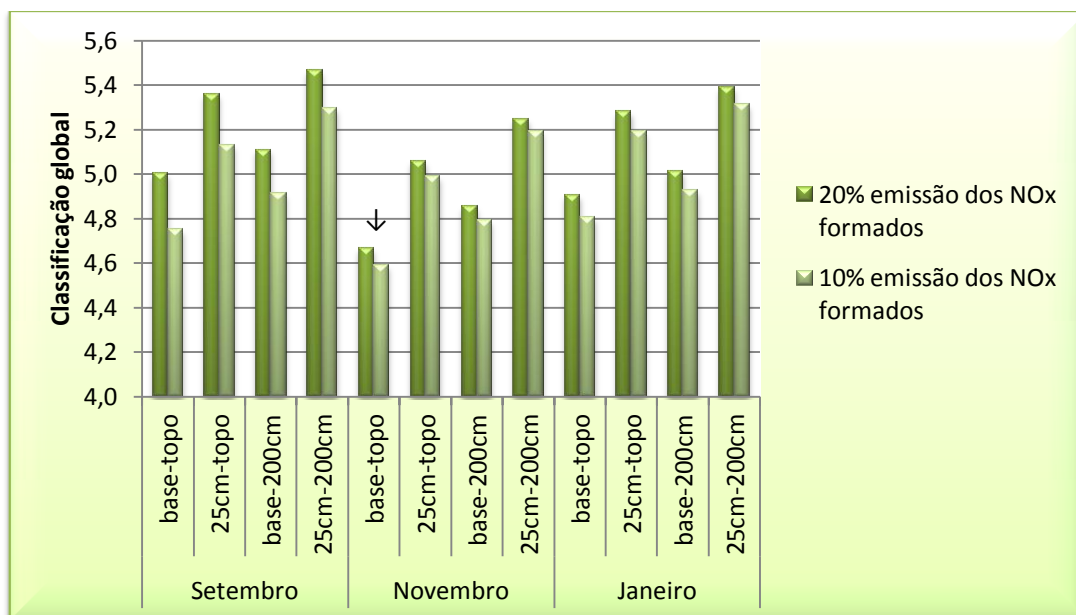


Figura 3.13– Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, e para diferentes taxas de emissão dos NOx formados na combustão da biomassa; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos)

Perante os resultados apresentados, verifica-se que a diminuição das emissões associadas à combustão da biomassa, resulta em todos os cenários e datas de colheita na diminuição dos valores da classificação agregada (um resultado positivo). Esta diminuição é mais significativa nos resultados de setembro, onde a quantidade de azoto acumulada na biomassa é ainda elevada. A opção mais vantajosa continua a ser a colheita de novembro e na qual todo o caule (da base ao topo) é processado.

3.3.4 Redução da aplicação do fertilizante azotado

A tabela 3.10 apresenta o balanço de azoto na utilização do *Miscanthus* para energia, no qual as emissões de azoto associadas à aplicação de fertilizante azotado e ao azoto acumulado são subtraídas ao azoto aplicado (60 kg/ha, N).

Os resultados apresentados na tabela 3.10 indicam que o balanço neste nutriente nas colheitas de novembro e janeiro, é positivo. Portanto, o remanescente contribuirá para as reservas do solo. Na colheita de setembro, no cenário 1, verifica-se que o balanço é negativo (-3,9 kg/ha, N), havendo necessidade da cultura em utilizar as reservas do solo neste nutriente. No cenário

2, o balanço é neutro e nos cenários 3 e 4, o balanço é positivo. Neste estudo, não foi contabilizado o azoto associado à água de rega (quer o disponível quer as emissões associadas) e o azoto da deposição atmosférica.

Tabela 3.10 – Balanço de azoto para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte

Data da colheita	Azoto acumulado na biomassa (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	39,3	35,4	30,4	26,4
Novembro	11,5	10,2	9,71	8,37
Janeiro	15,6	14	13,2	11,6
Data da colheita	Azoto acumulado na biomassa + azoto emitido na aplicação do fertilizante azotado (24,6 kg.ha ⁻¹ , N) (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte (A)			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	63,9	60,0	55,0	51,0
Novembro	36,1	34,8	34,3	33,0
Janeiro	40,2	38,6	37,8	36,2
Data da colheita	Balanço de azoto (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte (60 kg.ha ⁻¹ – A)			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	-3,9	0,0	5,0	9,0
Novembro	23,9	25,2	25,7	27,0
Janeiro	19,8	21,4	22,2	23,8

Significa portanto, que, pelo menos nas colheitas e novembro e janeiro, o azoto aplicado sob a forma de fertilizante pode ser reduzido (para 40 kg/ha, N). Atendendo a que o *Miscanthus* não responde a diferentes níveis de fertilização, porque existem evidências de que a cultura pode utilizar o azoto orgânico de bactérias fixadoras de azoto, livres ou associadas ao sistema radicular (Jørgensen, 2010), o balanço negativo que pode ocorrer se a colheita for realizada em setembro não é indicativo de um impacto no solo. Por outro lado, a diminuição da fertilização azotada irá contribuir para a redução dos consumo energético associado à sua produção e às emissões de azoto associadas à sua aplicação.

A tabela 3.11 apresenta o balanço energético considerando a aplicação de 40 kg/ha (N) e as emissões de azoto devido à aplicação de 40 kg/ha (N) e totalidade das emissões de azoto, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte, considerando as emissões emitidas na combustão da biomassa

Tabela 3.11 – Balanço energético na produção e conversão em energia dos *Miscanthus*, e emissões de azoto estimadas a partir da quantidade de fertilizante azotado aplicado e da quantidade de azoto acumulada nos caules de *Miscanthus*, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (com redução da aplicação do fertilizante azotado para 40 kg/ha, N)

Data da colheita	Balanço energético na produção e conversão em energia de <i>Miscanthus</i> (GJ.ha ⁻¹ , por ano) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	232	194	212	174
Novembro	230	192	210	173
Janeiro	213	176	200	163
	Emissões derivadas da aplicação de 40 kg/ha (N) (kg.ha⁻¹, N)			
	16,4			
Data da colheita	Emissões de azoto (kg.ha ⁻¹ , N) por altura de corte			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	22,7	22,1	21,3	20,6
Novembro	18,2	18,0	18,0	17,7
Janeiro	18,9	18,6	18,5	18,3

A figura 3.14 mostra os resultados finais agregados de acordo com o sistema de ponderação SP1, para as diferentes datas de colheita e para os diferentes cenários de altura do corte, considerando diferentes taxas de aplicação do fertilizante azotado. Perante os resultados apresentados, verifica-se que o ligeiro aumento do balanço energético (muito pouco significativo) e a diminuição das emissões associadas à aplicação do fertilizante azotado (significativas), resulta em todos os cenários e datas de colheita na diminuição dos valores da classificação agregada (um resultado positivo). A opção mais vantajosa continua a ser a colheita de novembro e na qual todo o caule (da base ao topo) é processado.

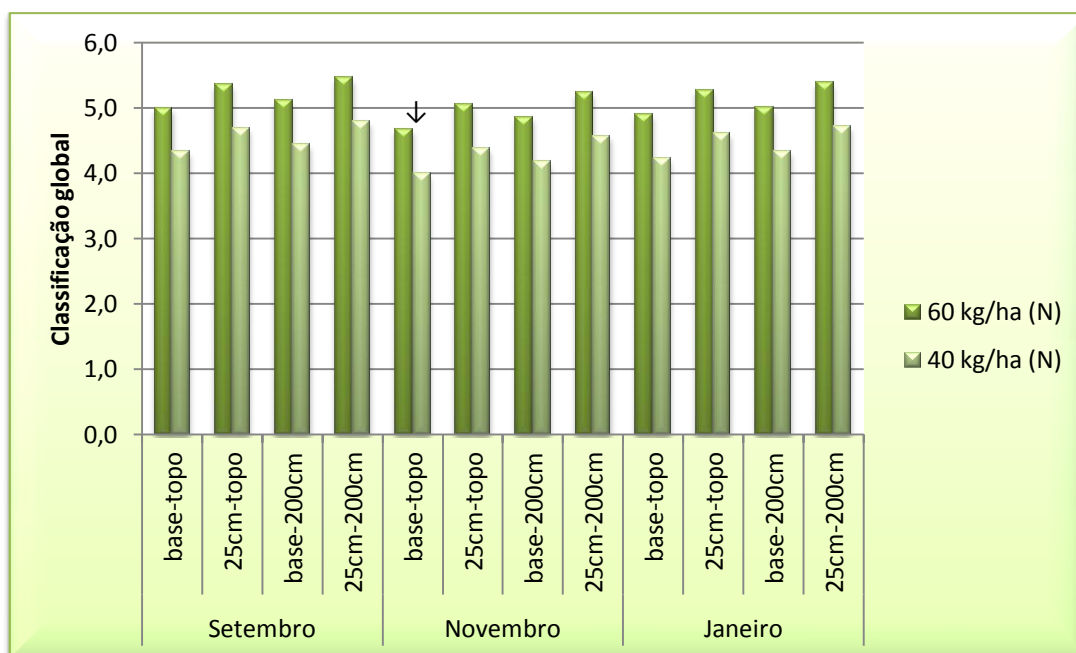


Figura 3.14– Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, e para diferentes taxas de aplicação do fertilizante azotado; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos)

3.3.5 Variação na produtividade da cultura

Neste ponto pretende-se avaliar o resultado obtido se a produtividade for alterada (pode aumentar devido a melhorias a nível do melhoramento da espécie ou diminuir, se ocorrer a presença de pragas). O aumento da produção irá afetar o balanço energético, quer a nível dos consumos quer a nível da produção. Em termos das emissões de azoto, considera-se que são as mesmas, estimando-se que a acumulação de azoto (kg/ha, N) será a mesma, quer com produções mais elevadas ou reduzidas, assumindo-se que a % de N na biomassa diminui com o aumento da produtividade e aumenta com a redução da produtividade.

A tabela 3.12 apresenta o balanço energético considerando um aumento/redução de 20% na produção. A figura 3.15 mostra os resultados finais agregados de acordo com o sistema de ponderação SP1, para as diferentes datas de colheita e para os diferentes cenários de altura do corte, considerando o aumento/redução da produtividade.

Perante os resultados apresentados, verifica-se que a redução da produtividade resulta em todos os cenários e datas de colheita no aumento dos valores da classificação agregada (um resultado negativo) e o oposto quando a produtividade aumenta. A opção mais vantajosa continua a ser a colheita de novembro e na qual todo o caule (da base ao topo) é processado.

Tabela 3.12 – Balanço energético na produção e conversão em energia dos *Miscanthus*, para as diferentes datas de colheita e diferentes alturas de corte (considerando variações na produtividade da cultura)

Data da colheita	Balanço energético na produção e conversão em energia de <i>Miscanthus</i> (GJ.ha ⁻¹ , por ano) por altura de corte, considerando 20% de redução na produtividade			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	183	153	167	136
Novembro	181	151	166	135
Janeiro	168	138	157	128
Data da colheita	Balanço energético na produção e conversão em energia de <i>Miscanthus</i> (GJ.ha ⁻¹ , por ano) por altura de corte, considerando 20% de aumento na produtividade			
	base-topo	25cm-topo	base-200cm	25cm-200cm
Setembro	280	235	255	210
Novembro	277	232	254	208
Janeiro	257	213	241	197

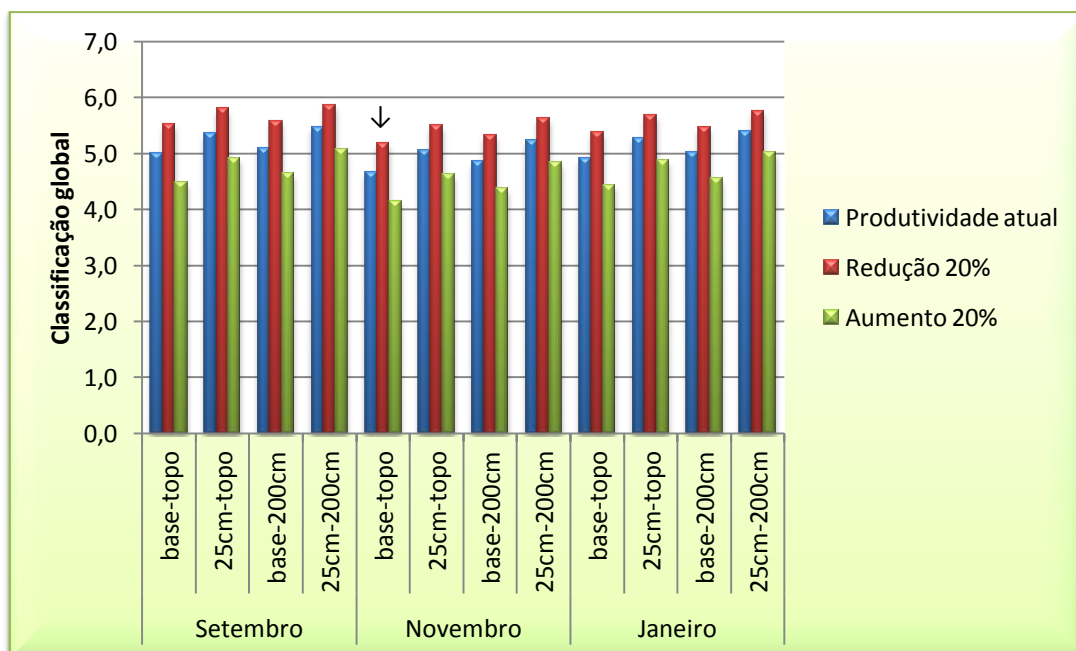


Figura 3.15 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, e para diferentes produtividades da cultura; a seta a preto indica a opção que apresenta resultados mais reduzidos (e mais positivos)

3.3.6 Análise global

A figura 3.16 mostra, para o caso da colheita de novembro e na qual todo o caule (da base ao topo) é processado (a opção mais vantajosa de acordo com os pontos anteriores), como a análise de sensibilidade pode fazer variar a classificação global agregada.

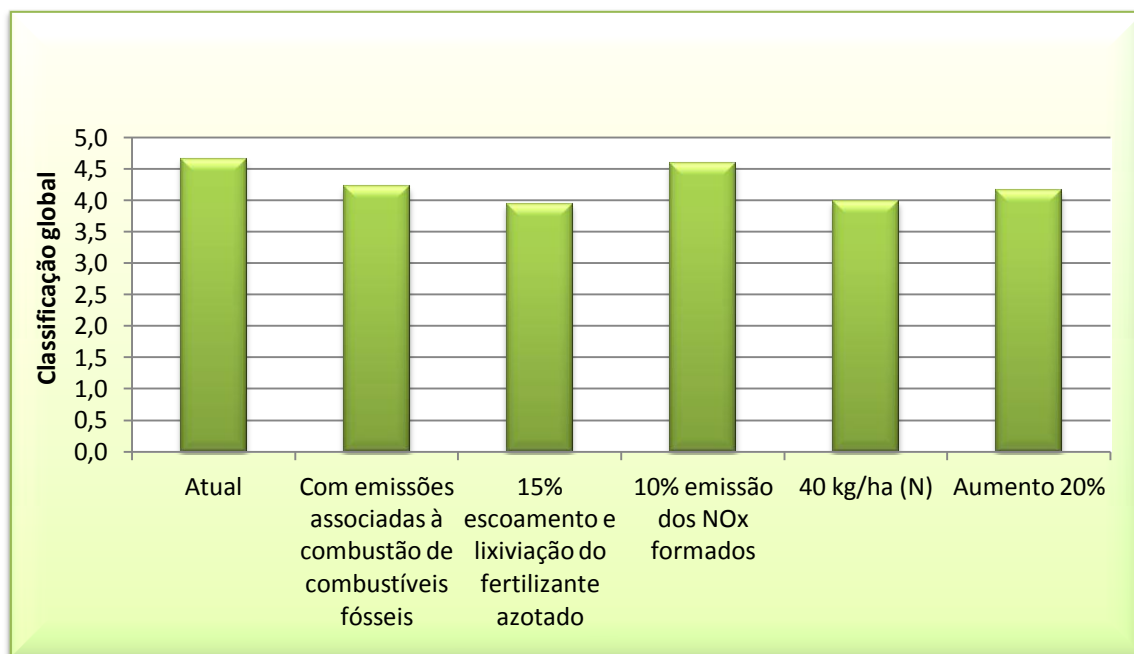


Figura 3.16 – Classificação global da utilização de *Miscanthus* para energia atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto, para diferentes datas de colheita e diferentes cenários de corte da biomassa, tendo em conta os parâmetros modificados na análise de sensibilidade

Da análise do gráfico da figura 3.16, verifica-se que a percentagem associada ao escoamento e lixiviação do fertilizante azotado e a quantidade de fertilizante azotado aplicado, são os fatores que mais afetam a classificação global, atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto. Se a quantidade de fertilizante azotado escoado e lixiviado for mais reduzida do que a estimada pelo IPCC (2006) e se a quantidade de fertilizante azotado diminuir para 40 kg/ha (N), verifica-se que, globalmente, a utilização dos *Miscanthus* para energia será mais sustentável (tendo em conta os dois indicadores utilizados).

4. Conclusões

A utilização de *Miscanthus*, para produção de energia, é um método bastante viável de utilização de recursos renováveis, com benefícios do ponto de vista da poupança de combustíveis fósseis e de outros fatores como a redução das emissões de gases com efeito estufa, entre outros. Neste trabalho, pretendeu-se avaliar o balanço energético da utilização de *Miscanthus* na produção de energia, por combustão de pellets, em sistemas domésticos, tendo em conta a data da colheita e a altura a que é efectuado o corte da plantação.

Obtiveram-se valores de balanço energético anual entre 162-232 GJ/ha e de razão produção energética/consumo energético entre 9,1-10,6. Atendendo a que os valores do balanço são positivos e os valores da razão energética são superiores à unidade, o estudo mostra que se deve considerar o cultivo e utilização dos *Miscanthus* para produção de energia em Portugal. Do ponto de vista energético, as colheitas de setembro e novembro e o cenário 1, no qual os caules são aproveitados da base ao topo, são as hipóteses que apresentaram os resultados mais elevados, devido a uma maior quantidade de biomassa processada. Os fatores que mais contribuíram para o consumo energético foram a energia necessária à conversão energética e à rega.

Em termos da utilização das culturas energéticas para produção de energia, os aspectos ambientais da sua produção, assim como os aspectos económicos e sociais, devem também ser tidos em conta no processo de decisão. Neste estudo, pretendeu-se também avaliar a influência do manejo da cultura (datas de colheita e alturas de corte), nos aspectos relativos às emissões de azoto, quer as derivadas da utilização dos *Miscanthus* para energia, quer as derivadas da aplicação dos fertilizantes azotados. Os resultados indicam que uma fatia importante do azoto aplicado é emitido para as águas e ar (41%, utilizando os factores do IPCC), com impactes ambientais e também económicos. Se consideramos que as emissões derivadas da combustão da biomassa podem ser estimadas pela quantidade de azoto acumulada na biomassa, verificamos que o cenário 4 (colheita dos 25-200cm) é o mais vantajoso, assim como as colheitas de novembro e janeiro, pois apresentam menores teores de azoto acumulado na biomassa.

A análise global, agregando os valores do balanço energético e das emissões de azoto decorrentes da utilização de *Miscanthus* para energia, indicam que a opção que apresenta

resultados com maior benefício é a colheita em novembro, utilizando a totalidade do caule (da base ao topo).

A percentagem associada ao escoamento e lixiviação do fertilizante azotado e a quantidade de fertilizante azotado aplicado, são os fatores que mais afetam a classificação global agregada, atendendo aos indicadores balanço energético e emissões de azoto. Se a quantidade de fertilizante azotado escoado e lixiviado for mais reduzida do que a estimada pelo e se a quantidade de fertilizante azotado diminuir para 40 kg/ha (N), verifica-se que, globalmente, a utilização dos *Miscanthus* para energia será mais sustentável (tendo em conta os dois indicadores utilizados).

5. Bibliografia

- Acaroglu M, Aksoy AS (2005), The cultivation and energy balance of *Miscanthus* production in Turkey, *Biomass and Bioenergy*, 29, 42-48.
- AGenergy (2010) disponível em www.agenergy.ie, consultada em Setembro de 2011
- Atkinson CJ (2009) Establishing perennial grass energy crops in the UK a review of current propagation options for *Miscanthus*, *Biomass and Bioenergy*, 22, 752-759.
- Best practice guidelines (2007) Planting and growing *Miscanthus*., 19p, disponível em http://www.naturalengland.org.uk/Images/miscanthus-guide_tcm6-4263.pdf, acedido em Setembro de 2012.
- Biewinga EE, van der Bijl G (1996) *Sustainability of energy crops in Europe. A methodology developed and applied*. Centre for Agriculture and Environment, Utrecht, CLM 234 -1996
- Boléo SMT (2011) *Environmental impact Assessment of energy crops cultivation in the mediterranean Europe*. Mestrado em Energia e Bioenergia, FCT/UNL, 76 p.
- Christian DG (2008) Growth, yield and mineral content of *Miscanthus* × *giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests, *Industrial crops and products*, 28, 320-327.
- Christian DG e Haase E (2001) Agronomy of *Miscanthus*. In: Jones, M.B. e Walsh, M. (eds), *Miscanthus for energy and fibre*, James & James (Science Publishers) Ltd, Londres, Reino Unido, 21-45.
- Christian DG, Yates NE, Riche AB (2005) Establishing *Miscanthus sinensis* from seed using conventional sowing methods. *Industrial crops and products*, 21, 109-111.
- Cipriano PAC (2010) Balanço Energético da Utilização de *Miscanthus* na produção de energia, em Portugal. Mestrado em Energia e Bioenergia, FCT/UNL, 41 p.
- Clifton-Brown JC, Lewandowski I (2000) Water use efficiency and biomass partitioning of three different *Miscanthus* genotypes with limited and unlimited water supply, *Annals of Botany* 86, 191-200
- Dauber J, Brown C, Fernando AL, Finnan J, Krasuska E, Ponitka J, Styles D, Thrän D, Van Groenigen KJ, Weih M, Zah R (2012) Bioenergy from “surplus” land: environmental and socio-economic implications, *BioRisk*, 7, 5-50
- Davies MJ, Longbottom H, Atkinson CJ (2011) Changes in duration of rhizome cold storage and manipulation of the growing environment to promote field establishment of *Miscanthus giganteus*, *Biomass and bioenergy*, 35, 4268-4279.
- El Bassam N (1998) *Energy Plant species*. James & James (Science Publishers) Ltd, London, United Kingdom, 321 p.
- El Bassam N (2010) Handbook of Bioenergy crops - A complete reference to species, development and applications. London, United Kingdom: Earthscan, Ltd., 516 p.
- Fernando AL, Duarte MP, Almeida J, Boléo S, di Virgilio N, Mendes B (2010a) The influence of crop management in the environmental impact of energy crops production. In: Spitzer, J., Dallemand, J.F., Baxter, D., Ossenbrink, H., Grassi, A., Helm, P. (eds) *Proceedings of the 18th European Biomass Conference and Exhibition, From Research to Industry and Markets*. 3-7 May 2010, Lyon, France, ETA-Renewable Energies and WIP-Renewable Energies, 2275-2279.
- Fernando AL, Duarte MP, Almeida J, Boléo S, Mendes B (2010c), Environmental impact assessment of energy crops cultivation in Europe, *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 4, 594-596.
- Fernando AL, Duarte P, Almeida J, Boléo S, Mendes B (2010b) *Final Report on Task 4.1, Environmental impact assessment (EIA) of Energy Crops production in Europe*, July 2010

- (4F Crop Project, E.U. Grant Agreement No: 212811, Coordination and Support Actions, FP7-KBBE-2007-1). Grupo de Disciplinas de Ecologia da Hidrosfera, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 80 p.
- Fernando AL, Oliveira JFS (2005) Caracterização do potencial da planta *Miscanthus x giganteus* em Portugal para fins energéticos e industriais. *Biologia Vegetal e Agro-Industrial*, 2, 195-204.
- Fernando, A.L.; Duarte, M.P.; Almeida, J.; Boléo, S. and Mendes B. (2010c). Environmental impact assessment (EIA) of Energy crops production in Europe. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 4, 594-604.
- Fernando, ALAC (2005). *Fitorremediação por Miscanthus x giganteus de solos contaminados com metais pesados*, PhD Thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisbon, 502 p.
- Foereid B, Neergaard A de, Høgh-Jensen H (2004) Turnover of organic matter in a *Miscanthus* field: effect of time in *Miscanthus* cultivation and inorganic nitrogen supply, *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 1075-1085.
- Glowacka K (2011) A review of the genetic study of the energy crop *Miscanthus*, *Biomass and Bioenergy*, 35, 2445-2454
- Heaton E, Dohleman F, Miguez AF, Juvik JA, Lozovaya V, Widholm J, Zabolina OA, McIsaac GF, David MB, Voigt TB, Boersma NN, Long SP (2010) *Miscanthus*: a promising biomass crop, *Advances in Botanical Research*, 56, 75-137.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T. and Tanabe, K. (eds). Published: IGES, Japan.
- Jørgensen U (2010) Benefits versus risks of growing biofuel crops: the case of *Miscanthus*. *Current Opinions in Environmental Sustainability*, 3, 24-30.
- Kahle P, Beuch S, Boelcke B, Leinweber P, Schulten H (2001) Cropping of *Miscanthus* in Central Europe: biomass production and influence on nutrients and soil organic matter, *European Journal of Agronomy*, 15, 171-184.
- Le Ngoc Huyen T, Rémond C, Dheilly RM, Chabbert B (2010) Effect of harvesting date on the composition and saccharification of *Miscanthus x giganteus*, *Bioresource Technology*, 101, 8224-8231.
- Lewandowski I (1998) Propagation method as an important factor in the growth and development of *Miscanthus x giganteus*, *Industrial crops and products*, 8, 229-245.
- Lewandowski I, Clifton-Brown J C, Andersson B, Basch G, Christian DG, Jorgensen U, Jones MB, Riche AB, Shwarz K U, Tayebi K e Teixeira F (2003) Biofuels: Environmental and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes, *Agronomy Journal* 95, 1274-1280.
- Lewandowski I, Heinz A (2003) Delayed harvest of *Miscanthus* – influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production, *European Journal of agronomy*, 19, 45-63.
- Lewandowski I, Kicherer A (1997) Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*, *European Journal of Agronomy*, 64, 163-177.
- Lewandowski I, Kicherer A, Vonier P (1995) CO₂ – Balance for the cultivation and combustion of *Miscanthus*, *Biomass and Bioenergy*, 8, 81-90.
- Lewandowski I, Schmidt U (2000) Nitrogen, energy and land use efficiencies of *Miscanthus*, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach, *Agriculture, ecosystems and environmental*, 112, 335-346.

- Melman AG, Schiphouwer H, Hendriksen, L.JAM.(1994) Energy content standards for arable farming and horticulture, part 1 and 2. Applied Natural Science Research Institute (TNO-ME), Apeldoorn, Holanda
- Picco D (2010) *Colture Energetiche per il didinquamento della laguna di Venezia. Progetto Biocolt.* C.E.T.A. - Centro di Ecologia Teorica ed Applicata. Veneto Agricoltura- Azienda Regionale per i Settori Agricolo, Florestale e Agroalimentare, Legnaro, Italia, 223 p.
- Schimdt W-P, Sullivan J (2002) Weighting in Life Cycle Assessments in a Global Context. *Int J LCA*, 7, 5-10
- Venturi G., Monti, A. (2005) Energia da colture dedicate: aspetti ambientali ed agronomici. *Conferenza Nazionale sulla Politica Energetica in Italia. Bologna 18-19 aprile 2005*, disponível em www.tecnosophia.org/documenti/2005_04_conferenza_energia_bologna.htm, acedido em Junho 2012.
- Venturi P e Venturi G (2003). Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass and Bioenergy*, 25, 235-255.
- Vimasol (2010) disponível em www.vimasol.pt, consultada em setembro de 2011
- Zegada-Lizarazu W, Elbersen HW Cosentino SL, Zatta A, Alexopoulou E e Monti A (2010). Agronomic aspects of future energy crops in Europe. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 4, 674-691.